



---

# PROPUESTA Y EVALUACIÓN DE UN NUEVO MODELO DE CÁLCULO PARA LA CAPACIDAD SECCIONAL DE PILARES MIXTOS TIPO CONCRETE-FILLED STEEL TUBE MEDIANTE UN ALGORITMO EVOLUTIVO

---

Proyecto Final de Máster

Autor: Jacobo Suarez Carganico

Tutor: David Hernández Figueirido



# Contenido del proyecto

I. Memoria

II. Presupuesto

III. Pliego de condiciones

IV. Anexos



# Memoria



## Contenido de la memoria

1. Introducción .....	15
1.1. Objeto.....	15
1.2. Alcance .....	15
1.3. Justificación .....	15
1.4. Antecedentes .....	16
2. Objetivos .....	17
2.1. Objetivos generales.....	17
2.2. Finalidad .....	17
2.3. Objetivos específicos .....	17
3. Pilares mixtos .....	18
3.1. Definición de un elemento mixto.....	18
3.2. Tipos de pilares mixtos .....	19
3.3. Ventajas .....	21
3.4. Inconvenientes .....	22
4. Base de datos con los ensayos.....	23
5. Algoritmos evolutivos.....	26
5.1. Población inicial .....	28
5.2. Función fitness .....	29
5.3. Selección.....	29
5.4. Crossover o cruce.....	30
5.5. Mutación .....	32
6. Elección del algoritmo .....	33
6.1. Selección del software .....	33
6.2. Descripción de los algoritmos.....	34

7.	Test.....	41
7.1.	Ronda de test con Karoo-GP .....	42
7.2.	Ronda de test con HeuristicLab .....	48
8.	Evaluación de los códigos de diseño actuales.....	63
8.1.	Eurocode 4 [4], EN1994-1-1:2004 .....	65
8.2.	AISC 360:2010 [7].....	68
8.3.	DBJ13-51:2010 [17] .....	71
8.4.	CAN CSA 16:2009 [19] .....	73
8.5.	NBR8800:2008 [9] .....	75
8.6.	BS5400:2005 [18].....	77
9.	Modelo obtenido .....	79
10.	Conclusiones.....	85
11.	Referencias .....	87



## Lista de ilustraciones

Ilustración 1. Pilares de sección total o parcialmente embebida en hormigón.....	19
Ilustración 2. Pilares de sección rellena hormigón en el que este está escondido.....	20
Ilustración 3: Perfil de un pilar mixto tipo CFT de sección circular .....	23
Ilustración 4. Etapas de un algoritmo evolutivo .....	26
Ilustración 5. Etapas, con operadores, de un algoritmo evolutivo.....	28
Ilustración 6. Ejemplo de Crossover. ....	30
Ilustración 7. Ejemplo de crossover .....	31
Ilustración 8. Algunos tipos de crossover.....	32
Ilustración 9. Captura de la ejecución de SoRa con DEAP.....	36
Ilustración 10. Captura de la ejecución de Karoo GP.....	38
Ilustración 11. Ejemplo de resultados obtenidos de una generación con Karoo GP .....	39
Ilustración 12. Captura del software HeuristicLab .....	40
Ilustración 13. Resultados de los ensayos contra resultados del modelo obtenido en el test Test 1.1 con Karoo GP .....	43
Ilustración 14. Resultados de los ensayos contra resultados del modelo obtenido en el test Test 1.2 con Karoo GP .....	44
Ilustración 15. Resultados de los ensayos contra resultados del modelo obtenido en el test Test 1.3 con Karoo GP .....	45
Ilustración 16. Resultados de los ensayos contra resultados del modelo obtenido en el test Test 1.4 con Karoo GP .....	46
Ilustración 17. Árbol del modelo obtenido en el test 1.12 con HeuristicLab .....	53
Ilustración 18. Gráfica de los resultados obtenidos con el modelo 1.12 para cada ensayo y su valor experimental.....	55
Ilustración 19. Resultados de los ensayos contra resultados del modelo obtenido en el test 1.12 con HeuristicLab.....	55
Ilustración 20. Árbol del modelo obtenido en el test 2.12 con HeuristicLab .....	58

Ilustración 21. Gráfica de los resultados obtenidos con el modelo 2.12 para cada ensayo y su valor experimental.....	59
Ilustración 22. Resultado obtenido de los ensayos frente al obtenido en el test 2.12 con HeuristicLab .....	59
Ilustración 23. . Árbol del modelo obtenido en el test 3.9 con HeuristicLab .....	61
Ilustración 24. Gráfica de los resultados obtenidos con el modelo 3.9 para cada ensayo y su valor experimental.....	62
Ilustración 25. Resultado obtenido de los ensayos frente al obtenido en el test 3.9 con HeuristicLab .....	62
Ilustración 26. Resultados experimentales frente a los obtenidos con el Eurocode 4 ....	66
Ilustración 27. Resultados experimentales frente a los obtenidos con el Eurocode 4 eliminando las limitaciones .....	67
Ilustración 28. Resultados experimentales frente a los obtenidos con el AISC 360 .....	69
Ilustración 29. Resultados experimentales frente a los obtenidos con el AISC 360 eliminando las limitaciones .....	70
Ilustración 30. Resultados experimentales frente a los obtenidos con el DBJ13 .....	71
Ilustración 31. Resultados experimentales frente a los obtenidos con el DBJ13 eliminando las limitaciones .....	72
Ilustración 32. Resultados experimentales frente a los obtenidos con el CAN CSA 16	74
Ilustración 33. Resultados experimentales frente a los obtenidos con el CAN CSA 16 eliminando las limitaciones .....	74
Ilustración 34. Resultados experimentales frente a los obtenidos con el NBR 8800 .....	75
Ilustración 35. Resultados experimentales frente a los obtenidos con el NBR 8800 eliminando las limitaciones .....	76
Ilustración 36. Resultados experimentales frente a los obtenidos con el BS5400 .....	77
Ilustración 37. Resultados experimentales frente a los obtenidos con el BS5400 eliminando las limitaciones .....	78
Ilustración 38. Árbol del modelo obtenido para $f_c \leq 50$ MPa .....	79

Ilustración 39. Gráfica de los resultados obtenidos con el modelo para CCFT $f_c \leq 50$ MPa para cada ensayo y su valor experimental .....	81
Ilustración 40. Gráfica de los resultados obtenidos con el modelo para CCFT $f_c \leq 50$ MPa frente al valor experimental .....	81
Ilustración 41.Árbol del modelo obtenido para $f_c > 50$ MPa .....	82
Ilustración 42.Gráfica de los resultados obtenidos con el modelo para CCFT $f_c > 50$ MPa para cada ensayo y su valor experimental .....	84
Ilustración 43. Gráfica de los resultados obtenidos con el modelo para CCFT $f_c > 50$ MPa frente al valor experimental .....	84



## Lista de tablas

Tabla 1. Test a realizar con Karoo GP .....	42
Tabla 2. Resultados de Nexp/N estimada por el Test 1.1 con Karoo GP.....	43
Tabla 3. Resultados de Nexp/N estimada por el Test 1.2 con Karoo GP.....	44
Tabla 4. Resultados de Nexp/N estimada por el Test 1.3 con Karoo GP.....	45
Tabla 5. Resultados de Nexp/N estimada por el Test 1.4 con Karoo GP.....	46
Tabla 6. Test a realizar con HeuristicLab para el archivo 1 .....	49
Tabla 7. Test a realizar con HeuristicLab para el archivo 2.....	50
Tabla 8. Test a realizar con HeuristicLab para el archivo 3.....	51
Tabla 9. Resumen de resultados de los test del archivo 1 con HeuristicLab.....	52
Tabla 10. Resultados de Nexp/N estimada por el Test 1.12 con HeuristicLab .....	56
Tabla 11. Ensayo con $f_c=0.1$ MPa .....	56
Tabla 12. Resumen de resultados de los test del archivo 2 con HeuristicLab.....	57
Tabla 13. Resultados de Nexp/N estimada por el Test 2.12 con HeuristicLab .....	59
Tabla 14. Resumen de resultados de los test del archivo 3 con HeuristicLab.....	60
Tabla 15. Resultados de Nexp/N estimada por el Test 3.9 con HeuristicLab .....	62
Tabla 16. Recapitulativo de las limitaciones de los códigos de diseño actuales .....	64
Tabla 17. Resultados de Nexp/N estimada por el Eurocode 4 .....	66
Tabla 18. Resultados de Nexp/N estimada por el Eurocode 4 eliminando las limitaciones .....	67
Tabla 19. Resultados de Nexp/N estimada por el AISC 360 .....	69
Tabla 20. Resultados de Nexp/N estimada por el AISC 360 eliminando las limitaciones.....	70
Tabla 21. Resultados de Nexp/N estimada por el DBJ13 .....	72
Tabla 22. Resultados de Nexp/N estimada por el DBJ13 eliminando las limitaciones.....	72
Tabla 23. Resultados de Nexp/N estimada por el CAN CSA 16 .....	74
Tabla 24. Resultados de Nexp/N estimada por el CAN CSA 16 eliminando las limitaciones ...	74
Tabla 25.. Resultados de Nexp/N estimada por el NBR 8800 .....	76
Tabla 26. Resultados de Nexp/N estimada por el NBR 8800 eliminando las limitaciones .....	76

Tabla 27.Resultados de $N_{exp}/N$ estimada por el BS5400.....	78
Tabla 28.Resultados de $N_{exp}/N$ estimada por el BS5400 eliminando las limitaciones.....	78
Tabla 29. Condiciones utilizadas para obtener el modelo de CCFT $f_c \leq 50$ MPa .....	79
Tabla 30.Resultados de $N_{exp}/N$ estimada para CCFT $f_c \leq 50$ MPa.....	82
Tabla 31. Condiciones utilizadas para obtener el modelo de CCFT $f_c > 50$ MPa .....	82
Tabla 32.Resultados de $N_{exp}/N$ estimada para CCFT $f_c > 50$ MPa.....	84

# 1. Introducción

## 1.1. Objeto

El objeto de este proyecto es el desarrollo de un nuevo modelo de cálculo para determinar la capacidad seccional de pilares mixtos tipo *concrete-filled steel tube* mediante un algoritmo genético o evolutivo y una base de datos de ensayos experimentales.

## 1.2. Alcance

Dada la complejidad del asunto, este proyecto no busca desarrollar un modelo que sea utilizable para el cálculo de pilares mixtos tipo *concrete-filled steel tube* sino analizar la conveniencia de utilizar un algoritmo evolutivo y en caso de alcanzar resultados prometedores dejar la puerta abierta para investigar en un futuro con algoritmos más complejos. Para este proyecto no se realizará ningún ensayo experimental y se utilizarán únicamente los que aparecen en la tabla del anexo 1.

Para la elaboración del presente proyecto se utilizarán únicamente softwares gratuitos. El algoritmo evolutivo utilizado para este proyecto derivará de librerías y códigos con licencia MIT, es decir, sin restricción para su uso, distribución o modificación, en caso de que vayamos a modificarla.

## 1.3. Justificación

Los pilares mixtos tipo CFT han ganado popularidad en los últimos años debido a sus buenas características estructurales, especialmente en el sector de la construcción por la posibilidad de reducir el tamaño de las columnas para la misma carga, aumentando el espacio útil. La normativa actual no contempla el uso de materiales de altas prestaciones como pueda ser el hormigón de alta resistencia. Se disponen de datos experimentales que incluyen estos materiales especiales, de ahí la importancia de desarrollar un modelo que prediga el comportamiento de estos nuevos pilares.

Se han realizado propuestas de modelos de cálculo simplificado anteriormente y algunos métodos complejos que consideran el comportamiento no-lineal, físico y geométrico de los materiales pero para estos últimos es necesario el uso de un ordenador. Por tanto, que se tenga conocimiento al inicio de este proyecto, ningún modelo simplificado ha

conseguido ser preciso y abarcar un abanico de valores geométricos y físicos amplio. Al no haberse utilizado aún algoritmos evolutivos para desarrollar un modelo de estas características, se considera apropiado utilizarlo para conocer su idoneidad.

#### **1.4. Antecedentes**

Se han realizado diferentes estudios sobre este tipo de pilar mixto. Gracias a esto podemos tener una base de datos suficientemente representativa como para poder desarrollar un modelo básico. También se han realizado diferentes estudios sobre propuestas de nuevos modelos de cálculo para pilares mixtos, como el trabajo de D. Hernández-Figueirido, A. Piquer y O. Martínez Ramos [1], donde proponen y evalúan un nuevo modelo creado mediante la utilización de redes neuronales.

Muy superior es el número de estudios realizados sobre modelos de predicción utilizando algoritmos genéticos, ya sean para planificar la inspección y el mantenimiento a depósitos a presión [2] o para determinar el coste de mantenimiento de ventiladores en túneles [3]. Podemos concluir por tanto, su uso en aplicaciones estructurales reales.



## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivos generales

Comprobar si un algoritmo evolutivo es adecuado para desarrollar un nuevo modelo de cálculo para pilares mixtos de sección circular totalmente embebida en hormigón (CCFT).

### 2.2. Finalidad

La finalidad de este proyecto es continuar la investigación sobre los pilares mixtos añadiendo nuevas opciones para su cálculo.

### 2.3. Objetivos específicos

El objetivo principal es encontrar una función para la capacidad seccional de un pilar mixto tipo CCFT que tenga como variables las características geométricas y estructurales de este y nos dé como resultado un valor similar al experimentado en los ensayos para la capacidad seccional. Supondremos que una buena fórmula será aquella que en promedio el valor experimental dividido entre el valor obtenido con la fórmula sea superior o igual a 0.98 e inferior o igual a 1.02, y que la desviación estándar ( $\sigma$ ) sea inferior a 0.12, el valor obtenido utilizando redes neuronales por de D. Hernández-Figueirido[1] .

Es decir,

$$\left| 1 - \frac{N_{exp}}{N(x_1, x_2, \dots)} \right| \leq 0.02$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} < 0.12$$

## 3. Pilares mixtos

### 3.1. Definición de un elemento mixto

La definición de un elemento mixto que podemos encontrar en el Eurocódigo 4 es la siguiente: “elemento estructural compuesto por hormigón y acero estructural o conformado en frío, interconectados por conectadores para limitar el desplazamiento longitudinal entre el hormigón y acero; y el despegue de un componente del otro”. [4].

Hay que hacer hincapié en que para poder ser considerado un elemento mixto “la unión entre el acero y el hormigón de un elemento mixto que tiene la suficiente resistencia y rigidez para permitir que ambos componentes sean calculados como parte de un único elemento estructural”. [4]. De esta forma se diferenciarían los elementos mixtos de las estructuras de acero y hormigón que se calcularían como elementos separados. Cuando pasan a ser un único elemento se dice que existe una interconexión.

Este tipo de estructuras ofrece una mejora de sus propiedades respecto a la suma de los elementos que la forman por separado, debido a que se complementan. Por ejemplo:

- El acero tiene buenas propiedades en tracción y el hormigón en compresión.
- El hormigón permite arriostrar los componentes de acero, normalmente delgados y esbeltos, evitando el pandeo.
- Al añadir acero aumenta la ductilidad del conjunto de la estructura.
- Mejora las propiedades de la estructura en caso de incendios al proteger el hormigón contra la corrosión y mejorar el aislamiento térmico [5].

Existen diferentes tipos de elementos o estructuras mixtas pero en este proyecto solo vamos a tratar los pilares mixtos.

### 3.2. Tipos de pilares mixtos

Definimos un pilar mixto como un elemento mixto estructural compuesto por acero y hormigón interconectados. Este tipo de estructura trabaja normalmente a compresión y pueden ser construidas mediante uniones propias de las estructuras de acero.

Según el Eurocódigo 4 [4], las secciones de este tipo de pilar puede clasificarse en dos grupos:

#### Secciones total y parcialmente embebidas en hormigón (CFT)

Este tipo de pilares se suele basar en secciones de acero I o H, donde, el espacio entre las alas está total o parcialmente cubierto por hormigón. En la siguiente ilustración tenemos tres ejemplos con perfiles y recubrimientos diferentes.

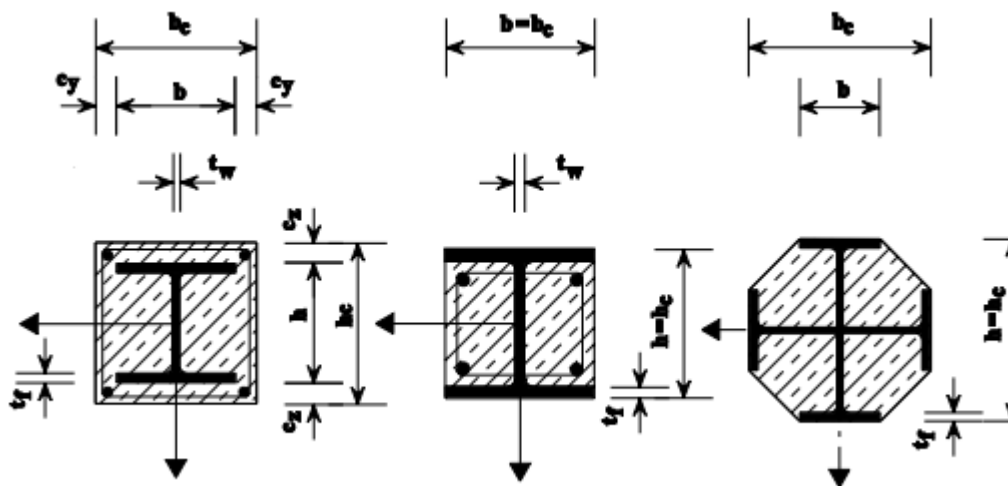
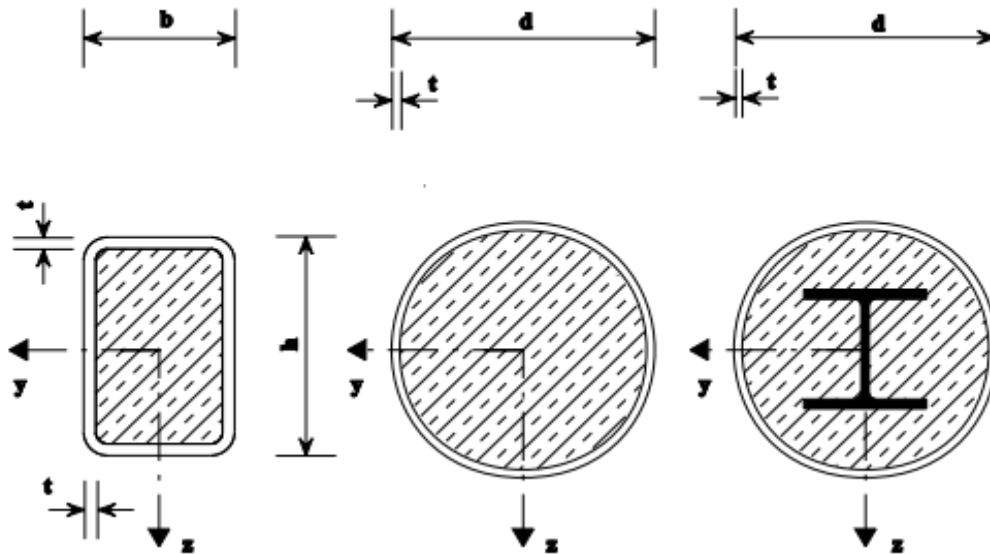


Ilustración 1. Pilares de sección total o parcialmente embebida en hormigón

## Secciones rellenas de hormigón en las que el hormigón está escondido

Este tipo de pilar está formado por un perfil de acero hueco, de geometría variable, ya sea circular, cuadrado, rectangular, etc., el cual se rellena de hormigón. Esto provoca un fenómeno de confinamiento que mejora el comportamiento a compresión del pilar.



*Ilustración 2. Pilares de sección rellena hormigón en el que este está escondido*

Este tipo de sección es la que vamos a estudiar en este proyecto. Centrándonos especialmente en los de sección circular.

### 3.3. Ventajas

En el apartado de definición de elementos mixtos ya se han comentado brevemente las ventajas de este tipo de estructura. Entrando un poco más en detalle las ventajas principales de los pilares mixtos de sección rellena de hormigón, que son los que se van a analizar en este proyecto, son las siguientes:

- Se crea una sinergia al interconectar los materiales, lo que mejora las propiedades del conjunto utilizando la misma cantidad de materiales que por separado. Esto se debe a varios fenómenos; el confinamiento del hormigón por parte del perfil hueco de acero, lo que aumenta su resistencia a la compresión al dificultar la disgregación del hormigón, y el hormigón en el núcleo dificulta el pandeo del perfil hueco de acero. Esta sinergia permite reducir las secciones geométricas para soportar las mismas cargas lo que permite un mejor aprovechamiento de los espacios.
- El hormigón hace que mejore la resistencia al fuego [5], no requiriendo protección adicional para periodos inferiores a dos horas.
- Mejora de comportamiento ante movimientos sísmicos. El hormigón tiene la capacidad de absorber una gran energía, por lo que en caso de sismo no se ven tan comprometido.
- Reducción del coste y tiempo. Al actuar la estructura de acero como un encofrado para el hormigón supone un ahorro en tiempo, tanto en el ensamblaje como en los tiempos de espera, y coste para soportar la misma carga máxima que respecto a otras soluciones, como los pilares de acero.

### 3.4. Inconvenientes

No todo son ventajas para los pilares mixtos. Hay un número importante de inconvenientes para su utilización. Los principales son:

- Falta de normativa para su cálculo. La normativa europea no recoge hormigones de alta resistencia, los cuales son frecuentemente utilizados en este tipo de pilares. Además no existe una estandarización entre las diferentes normativas internacionales.
- Cálculo complejo. Todas las fórmulas simplificadas recogidas en la normativa son poco precisas y demasiado conservadoras. Se requiere de software complejos para su cálculo y aun así se recomienda ser conservador. Esto dificulta su uso al no poder ser explotadas al máximo su capacidad.
- Esbeltez elevada. En este proyecto no vamos a entrar a estudiar el fenómeno de la esbeltez, utilizando para ello ensayos realizados en pilares cortos, pero es algo a considerar para grandes estructuras.
- Debe existir interconexión, entre el acero y el hormigón, para poder transferir esfuerzos entre ellos. Esto en la práctica puede resultar complicado y en ciertas ocasiones costoso si requiere elementos suplementarios como conectores.

El inconveniente más importante es una falta de experiencia. Se han realizado diferentes estudios pero casi todos ellos en probetas y a escala reducida. Esto crea un clima de inseguridad a la hora de utilizarlos respecto a otras estructuras mucho más estudiadas y testeadas. Aun así, el pilar mixto parece una muy buena opción para grandes infraestructuras, tales como rascacielos o puentes.

## 4. Base de datos con los ensayos

La base de datos completa utilizada puede encontrarse en el anexo 1. Esta base de datos es una recolección de diferentes ensayos realizados por varios autores datando desde 1966 hasta la actualidad. Esta base es la misma utilizada por D. Hernández-Figueirido, A. Piquer y O. Martínez Ramos [1]. Esta base de datos, como dicen en su artículo, está formada por diversos autores más correcciones y ensayos propios, citando el artículo: «*Several experimental databases have been developed such as Googe, Aho and Leon, Denavit and Hajjar, Gourley, Kim and Perea. However, a careful comparison of the database with those published in the original reports, reveals some errors due to consider cylindric compressive strength when the concrete strength was measured in cubic test. In this paper authors have completed (including news test) the databases and have corrected the mistakes founded in the consideration of concrete strength.*» Además también incluye el trabajo de otros autores como Giakoumelis [20] y Oliveira et al.[21].

En este proyecto como se ha comentado anteriormente solo vamos a estudiar los pilares mixtos CFT, y de estos únicamente aquellos de sección circular. Se realiza únicamente para los de sección circular para simplificar, ya que esto se trata de una mera introducción.

La base de datos utilizada para el análisis contiene 490 ensayos diferentes. Esta base de datos solo incluye ensayos realizados a probetas CFT de sección circular con carga centrada para evitar momentos flectores y de corta longitud (de 153mm a 1083mm) para reducir los efectos de segundo orden del pandeo. Se tiene toda la información geométrica de la probeta:

**t (mm):** Espesor del acero

**d (mm):** Diámetro de todo el pilar, incluyendo el acero.

**L (mm):** Altura/longitud de la probeta,

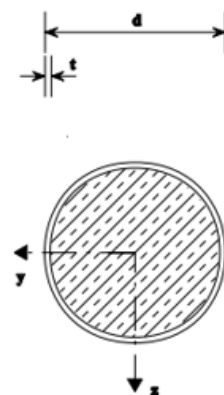


Ilustración 3: Perfil de un pilar mixto tipo CFT de sección circular

Con estos datos se pueden obtener las áreas de la sección de hormigón ( $A_c$ ) y la del acero ( $A_a$ ).

$$A_c = \pi \left( \frac{d - 2t}{2} \right)^2$$

$$A_a = \pi \left( \frac{d}{2} \right)^2 - A_c$$

También incluye las propiedades mecánicas del acero y del hormigón:

**$f_y$  (N/mm<sup>2</sup>):** Resistencia a rotura del tubo de acero

**$f_c$  (N/mm<sup>2</sup>):** Resistencia a la compresión del hormigón. Medido según el test cilindro de 150 x 300 mm

**$N_{exp}$  (N):** Capacidad a rotura experimental

**Modo de fallo (*Failure mode*):** De valor binario, siendo 1 *yielding-crushing* o 0 *local buckling*.

De los 440 ensayos, 303 ensayos cuentan con valores de  $f_c \leq 50$  MPa y 187 ensayos con valores de  $f_c > 50$  MPa. Esto permite tener un amplio abanico de ensayos y ver el efecto del hormigón de alta resistencia supuesto en un  $f_c > 50$  MPa. Aunque el número es inferior también hay ensayos con  $f_y > 460$  MPa, que es lo que se consideraría acero de alta resistencia.

Resumiendo las características más importante de los ensayos de la base de datos se puede resumir tal que:



- a) Materiales: La resistencia a rotura del acero varía de 185.70 MPa a 602.70MPa, mientras que la resistencia a compresión del hormigón, test cilindro 150 x 300 mm, varía de 0.10 MPa a 135.60 MPa.
- b) Geometría: El diámetro del pilar (D) varía de 48.00 mm a 361.00 mm. El espesor de la viga de acero (t) varía de 1.00 mm a 10.37 mm. La longitud de la probeta varía de 153mm a 1083mm. El ratio D/t varía de 13.64 a 168.14 y el ratio L/D varía de 1.38 a 4.00

## 5. Algoritmos evolutivos

La idea de algoritmos genéticos (AG) fue inicialmente introducida por John Holland en los años 70 [10]. Los algoritmos genéticos utilizan técnicas basadas en la selección natural y la evolución de especies. Los algoritmos genéticos se utilizan para encontrar soluciones a problemas donde se tiene poca información para utilizar otros métodos, al no requerir de un gran conocimiento del problema. Además, la forma en la que buscan la solución óptima es muy genérica lo que hace que funcionen relativamente bien en todos los campos.

El funcionamiento de los algoritmos genéticos se basa en la abstracción del problema a una población de individuos donde cada individuo es una solución al problema estudiado. Estos individuos son evaluados por la función fitness, la cual varía en función del problema a resolver, y obtienen una puntuación fitness que muestra lo que se adaptan a la solución esperada. Cada generación es evaluada y se les aplican las técnicas básicas de los AGs para crear otra generación. Este proceso se repite hasta alcanzar un valor fitness previamente definido o hasta alcanzar un número determinado de generaciones. La ilustración 4 muestra la secuencia de las etapas principales.

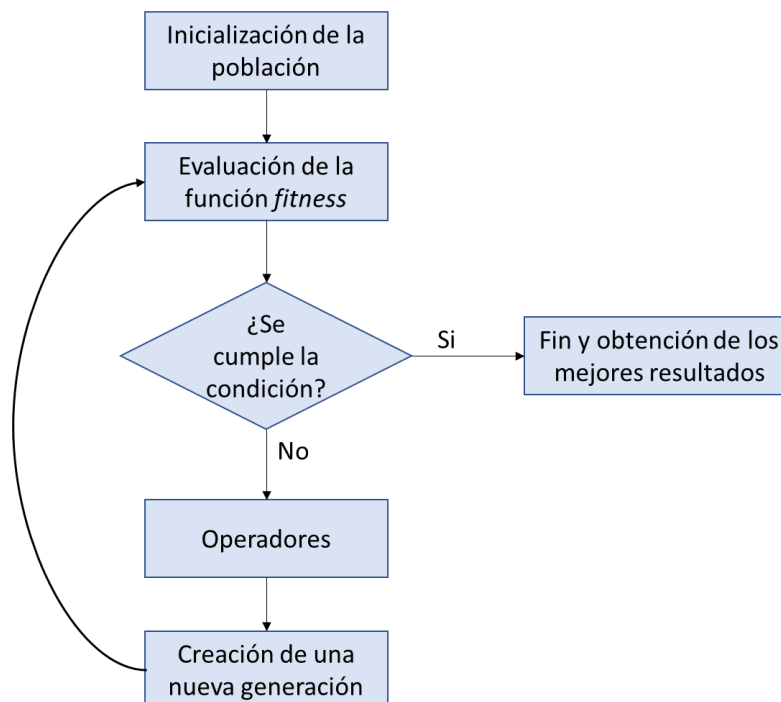


Ilustración 4. Etapas de un algoritmo evolutivo

Los algoritmos genéticos comparten la nomenclatura con los procesos biológicos y evolutivos. Por tanto, para poder entender bien su funcionamiento es necesario comprender los términos utilizados. [11].

- **Individuo:** Cualquier posible solución al problema
- **Población:** conjunto de todos los individuos
- **Espacio de búsqueda:** Todas las soluciones posibles al problema
- **Cromosoma:** Blueprint de un individuo
- **Rasgo:** Posible aspecto de un algoritmo
- **Alelo:** Posibles alternativas especificadas para cada gen
- **Locus:** posición de un gen en un cromosoma
- **Genoma:** Conjunto de todos los cromosomas para un individuo

En un algoritmo genético podemos observar 5 grandes fases:

1. Población inicial
2. Función fitness
3. Selección
4. Crossover
5. Mutación

La selección, el crossover y la mutación son lo que más arriba hemos definido como operadores. La ilustración 5 muestra la sucesión de las etapas de un algoritmo genético incluyendo los tres operadores principales.

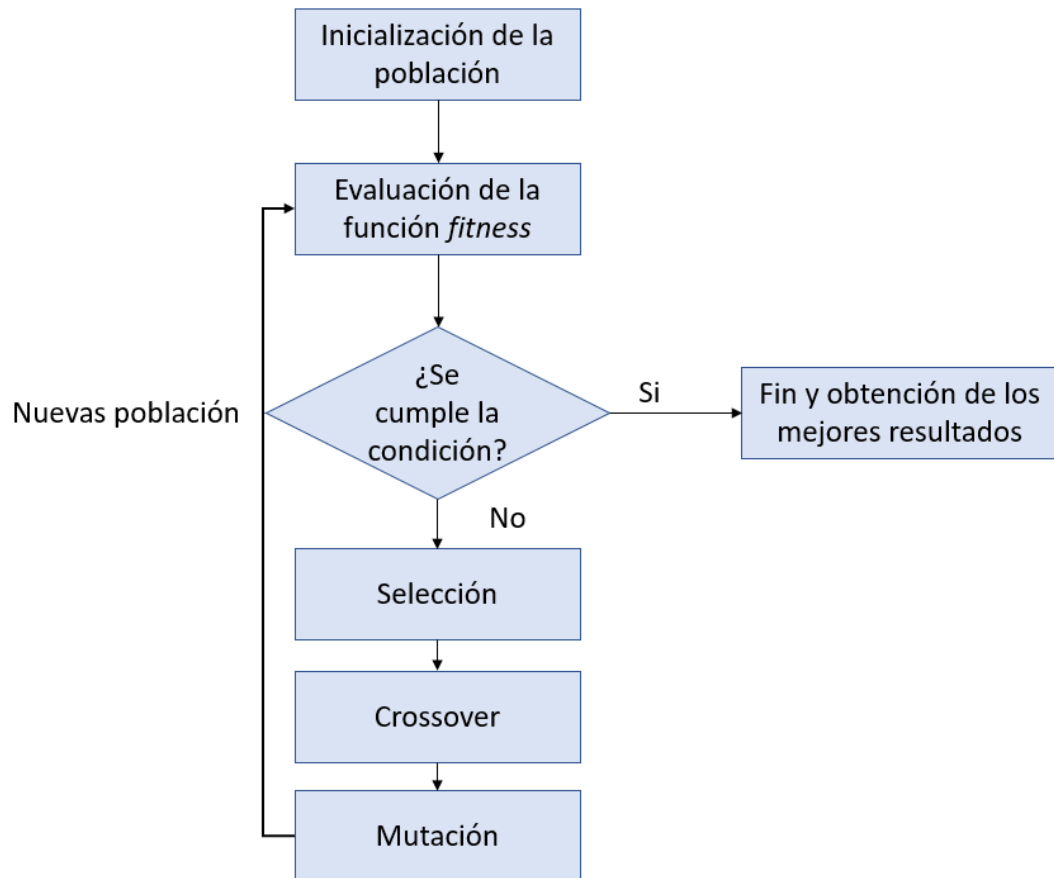


Ilustración 5. Etapas, con operadores, de un algoritmo evolutivo

### 5.1. Población inicial

La población inicial se podría definir como la generación 0 de individuos que son la primera solución al problema. Esta puede ser generada de manera aleatoria o inicializada previamente (*seeding*). Esta última opción puede ser muy beneficiosa ya que en ciertos problemas consigue una reducción significativa del número de iteraciones necesarias para alcanzar cierto *fitness*, pero en cambio otros problemas se benefician mucho menos [22].

Por tanto, aunque un buen uso de la inicialización puede ahorrar muchas iteraciones y tiempo, un uso excesivo de la inicialización podría resultar contraproducente al reducir la capacidad de exploración del algoritmo.

## 5.2. Función fitness

La función fitness otorga un valor (fitness) a cada individuo de la población. Este valor mide como de buena es la solución al problema. Por tanto, la función fitness variará en función del problema al que nos enfrentemos. En nuestro caso el individuo será una función de los parámetros geométricos del pilar y las características los materiales que lo componen cuya solución será la capacidad seccional (N):

$$N(f_y, f_c, t, D) = A1 * f_y + A2 * f_c + A3 * t + A4 * D$$

La función evaluación utilizaría la base de datos para comparar la N experimental mediante ensayo con la N obtenida de cada individuo para cada pilar. La función evaluación podría tener diferentes matices como utilizar el error relativo medio, el error absoluto medio, etc.

## 5.3. Selección

La idea de la selección es escoger a los individuos con mejores genes (mejor fitness) y pasar sus genes a la siguiente generación, estos se denominan padres (*parents*). Existen diferentes técnicas normalizadas para realizar la selección en un algoritmo genético. [12][15].

**Selección elitista:** Solo los individuos con mayor fitness son seleccionados. El número de la selección es determinado previamente. El problema con esta forma de selección es que se pierde variedad afectando a futuras generaciones y pudiendo estancarse en máximos locales. No es muy recomendable exceptuando sistemas muy simples donde no sean necesarias muchas generaciones.

**Selección de la ruleta:** Es una forma de selección que considera el fitness del individuo, pero donde también interviene el azar. Simula el juego de la ruleta, con la diferencia de que a mayor fitness mayor es la probabilidad de ser escogido. Este método añade mayor variedad respecto al método elitista, permitiendo la posibilidad de alcanzar soluciones más complejas. El problema de este método es si hay algún valor con un fitness muy superior al resto, ya que la probabilidad de elección será demasiado alta.

**Selección por torneo:** Subgrupos, normalmente pequeños, de individuos de tamaño predeterminado son seleccionados y enfrentados entre ellos. Se selecciona uno de cada subgrupo únicamente. Esta opción es la que más variabilidad suele ofrecer, pero se corre el riesgo de que los individuos con mejor fitness se pierdan por el camino no pudiendo alcanzar la convergencia.

Por tanto, el método adecuado dependerá del sistema que se desee resolver. Así, al utilizar métodos donde el fitness tenga mucho peso se alcanzará antes la convergencia, pero la probabilidad de alcanzar soluciones complejas disminuye.

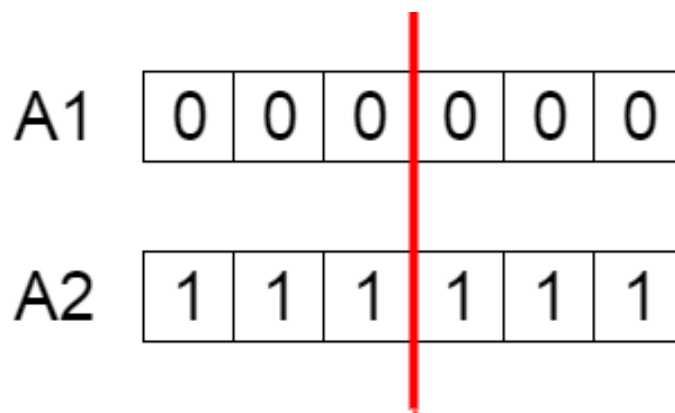
#### 5.4. Crossover o cruce

Tras la selección se procede a producir el “*offspring*” o la descendencia [13]. Para ello se realiza el crossover o cruce, la cual se podría definir como la fase más importante de la evolución en un algoritmo genético para un problema de estas características [6].

Aunque existen diferentes tipos de crossover, el más utilizado el crossover de un único punto. Este consiste en seleccionar un locus para cada par de padres e intercambiar sus partes rompiéndose por ese locus. De esta se forman dos nuevos individuos para la descendencia, llamados hijos.

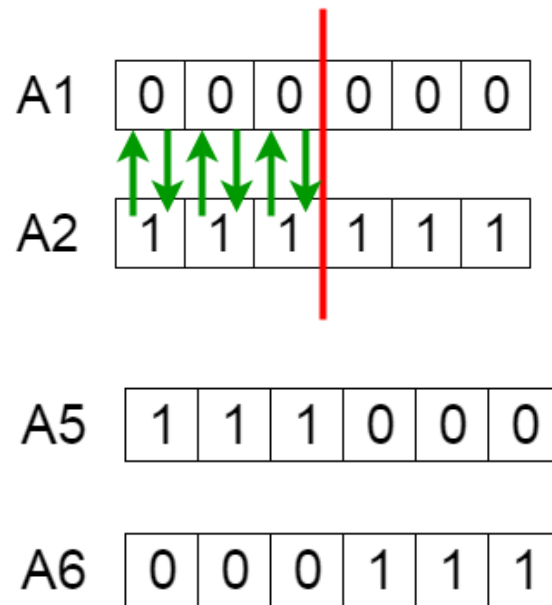
De forma visual es más sencillo entenderlo y se muestra en las siguientes ilustraciones:

- Se elige un locus, igual para ambos padres. En este caso tendríamos el padre A1 y A2 y se escogería el locus 3.



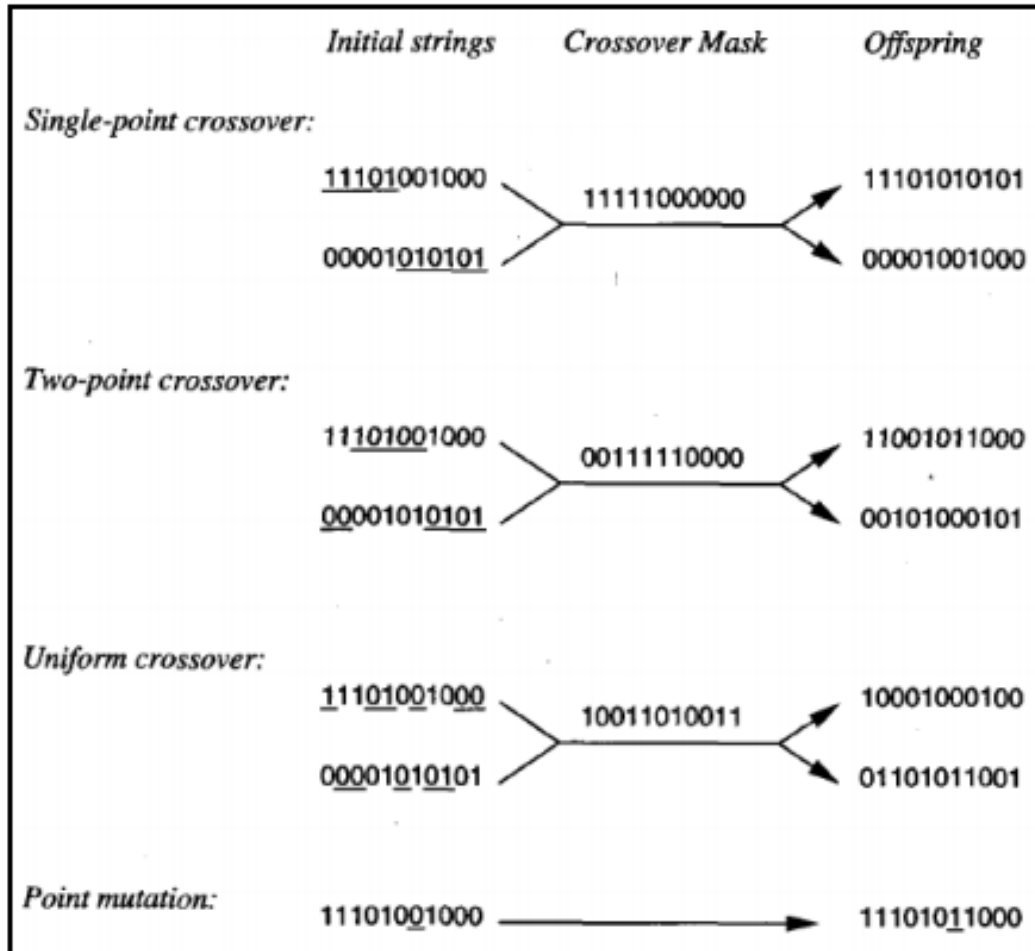
*Ilustración 6. Ejemplo de Crossover.*

- Se intercambian los valores formando dos nuevos individuos, A5 y A6.



*Ilustración 7. Ejemplo de crossover*

Existen métodos algo más complejos, aunque siguen una filosofía parecida. La Ilustración 8 [14] muestra un ejemplo de otros tipos donde la selección de locus es más compleja.



*Ilustración 8. Algunos tipos de crossover*

## 5.5. Mutación

La mutación consiste en realizar pequeños cambios al azar en alguno de los alelos del individuo. Este cambio dependerá del tipo de genes que tengamos.

La probabilidad de mutación suele ser pequeña pero es necesaria para asegurar diversidad en la población.

Según observaciones en diferentes test [6], se llegó a la conclusión que para problemas complejos el operador de cruce o crossover es un operador clave por encima del de mutación.



## 6. Elección del algoritmo

Hoy en día existen diferentes softwares y plataformas para desarrollar algoritmos. En este proyecto no se va a desarrollar un algoritmo desde cero ya que no forma parte del alcance del proyecto. En este proyecto se intentarán utilizar diferentes algoritmos ya existentes y con licencia gratuita que permita explotarlos y modificarlos. Estos algoritmos se modificarán para adaptarlos mejor a nuestro problema.

### 6.1. Selección del software

Para este proyecto se utilizarán diversos software para darle algo de diversidad y probar algunas de las herramientas que podemos encontrar actualmente.

Uno de mis objetivos personales para este proyecto era introducirme en el uso de Python. Python es un lenguaje informático abierto que ha ganado mucha popularidad en los últimos 20 años. Este lenguaje permite una programación multiparadigma aumentando las opciones y facilitando la programación. Por tanto, al menos uno de los algoritmos utilizados será diseñado con Python.

Primero se escogió la librería DEAP [23] y un *front-end* para este denominado SoRa [24]. La librería DEAP es una librería para Python de reciente creación que permite utilizar AGs para resolver problemas de diferentes tipos [25].

Como segunda opción utilizando Python se utilizará Karoo GP [26], que permite de manera sencilla, utilizando la librería TensorFlow, implementar un algoritmo evolutivo a una base de datos.

Por último se utilizará el software HeuristicLab [26], el cual actúa como framework para algoritmos evolutivos y heurísticos.

Todos estos algoritmos y software son, como hemos comentado anteriormente, con licencia pública para su uso y distribución, ya que formaba parte del alcance del proyecto.

## 6.2. Descripción de los algoritmos

### 6.2.1. DEAP [23] con SoRa [24]

DEAP es una librería de Python que permite elaborar algoritmos genéticos complejos con relativa facilidad. Se decidió utilizar SoRa como front-end para acelerar y facilitar el proceso de introducción, procesamiento y muestra de los datos. Esto requiere de varias librerías además de DEAP, como numpy o sympy, para ello se ha creado un repositorio con anaconda y se ejecutará a partir de este.

SoRa se inicializa con ayuda de un fichero .json con las pautas a seguir.

Archivo donde están los datos:

```
"infile"          : "C:/Users/Admin/Anaconda3/envs/SoRa/Lib/site-packages/sora/prueba_base",
"infileExtension" : "csv",
```

Variables del archivo, siendo Nexp la solución deseada para nuestro modelo y las invars las variables que formarán el modelo.

```
"inVars"      : [ "Ac", "As", "Fc", "Fy" ],
"targetVar"   : "Nexp",
```

Si se desea se puede inicializar la población inicial con un seed predefinido. Además se puede definir un límite para el árbol del modelo.

```
"seed"       : 0,
"depthLimit" : 30,
```

El tipo de error que se desea para comparar el rendimiento de las soluciones y los operadores que se desean utilizar en el modelo.

```
"prettyPrint" : true,
"errorfunc"   : "avgAbsErrorSquared",
"primitives" : [
    "add",
    "mul",
    "div",
    "neg",
    "sqrt",
    "power",
    "exp",
    "log",
    "log10",
    "sin",
    "cos",
    "tan",
    "arcsin",
    "arccos",
    "arctan"
],
```

Los tipos de operadores genéticos :

```
"HallOfFame" : {
    "type" : "pareto"
},
"select" : [
    {
        "type" : "selTournament",
        "tournsize" : 15
    } ],
"expr" : { "type" : "genHalfAndHalf",
    "min_" : 1,
    "max_" : 4
},
"expr_mut" : { "type" : "genHalfAndHalf",
    "min_" : 0,
    "max_" : 3
},
```

El tipo de algoritmo de DEAP a implementar y sus condiciones tales como tamaño de la población inicial o el número de generaciones a realizar:

```
"algo" : {
    "type" : "harm",
    "initialPopulationSize" : 1000,
    "numGenerations" : 100,
    "stopFrequency" : 50,
    "cxpb" : 0.7,
    "mutpb" : 0.3,
    "alpha" : 0.05,
    "beta" : 10,
    "gamma" : 0.25,
    "rho" : 0.9,
    "nbrindsmodel" : -1,
    "mincutoff" : 20
},
"mate" : "cxOnePoint",
"mutator" : {
    "type" : "mutUniform"
},
"checkpoints" : {
    "filenamebase" : "None",
    "allRanks" : false,
    "frequency" : 100
},
```

Se pueden incluir constantes concretas, ya sean fijas o que estén en un cierto rango predefinido:

```
"constants" : [ {
    "type" : "uniform",
    "min" : 0,
    "max" : 0
} ]
}
```

```

C:\Users\jacob\Anaconda3\envs\SoRa\python.exe C:\Users\jacob\Anaconda3\envs\SoRa\Lib\site-packages\sora\python.exe C:\Users\jacob\Anaconda3\envs\SoRa\Lib\site-packages\sora\configuration...
4(Ac, atan(tan(Aa))), add(add(mul(Ac, Aa), Ac), Fy)), Aa))), tan(cos(Fc))), mul(Ac, cos(Fc))), atan(Ac)), Aa), atan(Ac)), mul(Ac, tan(cos(Fc))), atan(mul(Aa, Aa)))
3 : (0.007058924621478888, 40.0) : sqrt(add(add(add(add(add(add(mul(Ac, Aa), Ac), Fy), Fy), mul(Ac, tan(cos(Fc))), mul(add(Ac, sin(cos(Fc))), mul(add(Ac, sin(neg(tan(cos(Fc))), Ac))), ta
n(Aa))), Ac), mul(Ac, cos(mul(Ac, tan(cos(Fc))))))
4 : (0.007113491685899541, 38.0) : sqrt(add(add(add(add(add(mul(Ac, Aa), Ac), Fy), Fy), mul(Ac, tan(cos(Fc))), mul(add(Ac, sin(neg(tan(cos(Fc))), tan(Aa))),
Ac), mul(Ac, cos(mul(Ac, tan(cos(Fc))))))
5 : (0.00713871666922186, 34.0) : sqrt(add(add(add(add(add(add(mul(Ac, Aa), Ac), Fy), Fy), mul(Ac, tan(cos(Fc))), mul(add(Ac, sin(neg(tan(cos(Fc))), tan(Aa))),
Ac), mul(Ac, cos(Ac))))
6 : (0.007549408547961193, 33.0) : sqrt(add(add(add(add(add(add(mul(Ac, Aa), Ac), Fy), Fy), mul(Ac, tan(cos(Fc))), mul(add(Ac, sin(neg(cos(Fc))), tan(Aa))), Ac),
mul(Ac, cos(Ac))))
7 : (0.008643414092778888, 27.0) : sqrt(add(add(add(add(add(add(mul(Ac, Aa), Ac), Fy), Ac), mul(Ac, cos(Fc))), mul(Ac, tan(Aa))), Ac), mul(Ac, cos(Fc)))
8 : (0.023692716826196534, 26.0) : sqrt(add(add(add(add(add(add(mul(Ac, Aa), Aa), Ac), Aa), mul(Fc, tan(Aa))), atan(Ac)), mul(Ac, tan(cos(Fc))), Ac))
9 : (0.02670983895819708, 23.0) : sqrt(add(add(add(add(add(mul(Ac, Aa), Aa), Ac), Ac), mul(Fc, tan(Aa))), mul(Ac, tan(cos(Fc))), Aa))
10 : (0.02670983895819708, 23.0) : sqrt(add(add(add(add(add(mul(Ac, Aa), Ac), Aa), Aa), Ac), mul(Fc, tan(Aa))), mul(Ac, tan(cos(Fc))))
11 : (0.05141344121495968, 22.0) : sqrt(add(add(add(add(add(mul(Ac, Aa), Ac), Aa), Ac), Ac), mul(Aa, tan(Aa))), mul(Ac, cos(Fc)))
12 : (0.11950933613104778, 21.0) : sqrt(add(add(add(add(add(mul(Ac, Aa), Ac), mul(Ac, tan(cos(Fc))), Ac), mul(Ac, tan(Aa))), Ac))
13 : (0.11950933613104778, 21.0) : sqrt(add(add(add(add(add(mul(Ac, Aa), Ac), Ac), Ac), mul(Ac, tan(Aa))), mul(Ac, tan(cos(Fc))))
14 : (0.11950933613104778, 21.0) : sqrt(add(add(add(add(add(mul(Ac, Aa), mul(Ac, tan(cos(Fc))), Ac), Ac), mul(Ac, tan(Aa))), Ac))
15 : (0.16512767785380614, 20.0) : sqrt(add(add(add(add(add(mul(Ac, Aa), Ac), Ac), Ac), Ac), mul(Aa, tan(Aa))), atan(Aa))
16 : (0.17870621805779363, 17.0) : sqrt(add(add(add(add(add(mul(Ac, Aa), Ac), Ac), Ac), mul(Aa, tan(Aa))), Ac))
17 : (0.3371274493260647, 15.0) : sqrt(add(add(add(add(mul(Ac, Aa), Aa), Ac), mul(Aa, tan(Aa))), Aa))
18 : (0.6940269954542535, 13.0) : sqrt(add(add(add(mul(Ac, Aa), Ac), Ac), mul(Ac, tan(Aa)))
19 : (0.6940269954542535, 13.0) : sqrt(add(add(add(mul(Ac, Aa), Ac), mul(Ac, tan(Aa))), Ac))
20 : (1.257388578058149, 11.0) : sqrt(add(add(mul(Ac, Aa), mul(Ac, tan(Aa))), Aa))
21 : (1.8189381338047188, 10.0) : sqrt(add(mul(Ac, Aa), mul(Aa, tan(cos(Fc))))
22 : (2.130362010491457, 9.0) : sqrt(add(mul(Ac, Aa), mul(Ac, tan(Aa)))
23 : (3.129798748606445, 7.0) : sqrt(add(mul(Aa, Ac), sqrt(Ac)))
24 : (3.2488447571494183, 4.0) : sqrt(mul(Aa, Ac))
25 : (3.2488447571494183, 4.0) : sqrt(mul(Ac, Aa))
26 : (322.0736823714868, 3.0) : tan(atan(Fc))
27 : (322.07368237157414, 1.0) : Fc

fitness size
gen nevals avg gen max min nevals avg gen max min nevals
0 0 inf 0 inf 0.00679372 0 35.599 0 174 1 0
1 1000 inf 1 inf 0.00679360 1000 36.392 1 172 1 1000
2 1000 inf 2 inf 0.00584991 1000 36.68 2 169 1 1000
3 1000 inf 3 inf 0.00573912 1000 36.714 3 174 2 1000
4 1000 inf 4 inf 0.006201 1000 37.287 4 174 1 1000
5 1000 inf 5 inf 0.00515026 1000 37.804 5 207 1 1000
6 1000 inf 6 inf 0.00522387 1000 39.913 6 220 1 1000
7 1000 inf 7 inf 0.00506797 1000 39.953 7 175 1 1000
8 1000 inf 8 inf 0.00451227 1000 38.842 8 175 1 1000
9 1000 inf 9 inf 0.00449049 1000 38.118 9 189 1 1000
10 1000 inf 10 inf 0.00350791 1000 39.179 10 215 1 1000

```

Ilustración 9. Captura de la ejecución de SoRa con DEAP

Por desgracia, aunque se consiguió ejecutar implementar el código con éxito SoRa no ofrecía los resultados esperados y los resultados se quedaban por detrás en los test respecto a los otros programas. Por tanto, se decidió dejar de utilizarlo para este proyecto y utilizar ese tiempo en realizar más test con los otros programas escogidos.

### 6.2.2. Karoo-GP [26]

Este algoritmo funciona con diversos métodos para encontrar la solución al problema que se enfrenta. Aunque acepta más tipos, para este problema se utilizará la regresión simbólica, ya que es la mejor opción en este caso [27] [28].

Este programa se ejecuta en Python y utiliza diferentes librerías externas tales como numpy, sklearn, sympy, ast o tensorflow. Para ello se ha creado un repositorio con anaconda y se ejecutará a partir de este.

El programa permite elegir que operadores queremos utilizar en nuestro modelo. Diversas pruebas serán necesarias para ver que operadores funcionan mejor.

```
operators = {ast.Add: tf.add, # e.g., a + b
             ast.Sub: tf.subtract, # e.g., a - b
             ast.Mult: tf.multiply, # e.g., a * b
             ast.Div: tf.divide, # e.g., a / b
             ast.Pow: tf.pow, # e.g., a ** 2
             ast.USub: tf.negative, # e.g., -a
             ast.And: tf.logical_and, # e.g., a and b
             ast.Or: tf.logical_or, # e.g., a or b
             ast.Not: tf.logical_not, # e.g., not a
             ast.Eq: tf.equal, # e.g., a == b
             ast.NotEq: tf.not_equal, # e.g., a != b
             ast.Lt: tf.less, # e.g., a < b
             ast.LtE: tf.less_equal, # e.g., a <= b
             ast.Gt: tf.greater, # e.g., a > b
             ast.GtE: tf.greater_equal, # e.g., a >= b
             'abs': tf.abs, # e.g., abs(a)
             'sign': tf.sign, # e.g., sign(a)
             'square': tf.square, # e.g., square(a)
             'sqrt': tf.sqrt, # e.g., sqrt(a)
             'pow': tf.pow, # e.g., pow(a, b)
             'log': tf.log, # e.g., log(a)
             'log1p': tf.log1p, # e.g., log1p(a)
             'cos': tf.cos, # e.g., cos(a)
             'sin': tf.sin, # e.g., sin(a)
             'tan': tf.tan, # e.g., tan(a)
             'acos': tf.acos, # e.g., acos(a)
             'asin': tf.asin, # e.g., asin(a)
             'atan': tf.atan, # e.g., atan(a)
             }
```

## Data

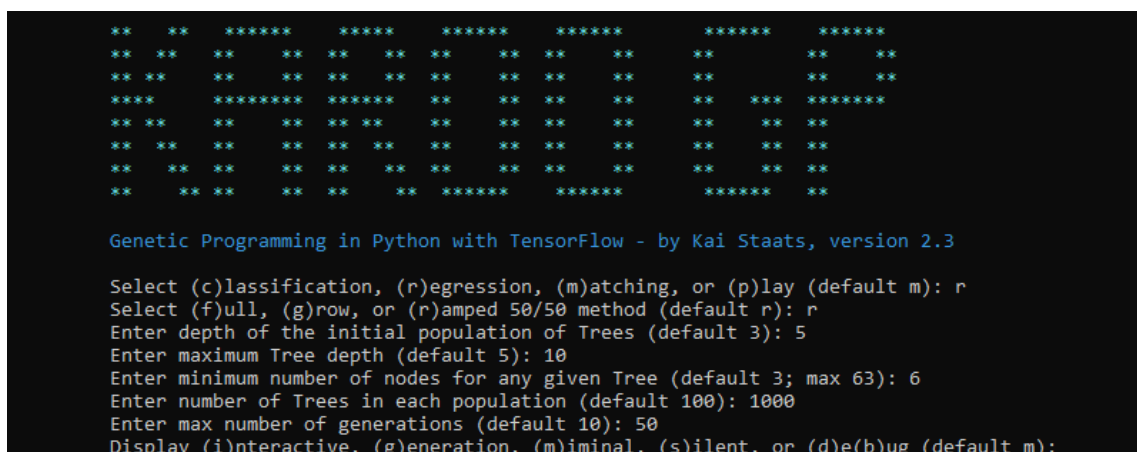
El programa requiere que los datos estén en formato .csv y que sigan ciertas condiciones, como por ejemplo que la solución, en nuestro caso Nexp, se denomine “s” o que las columnas estén separadas por comas.

## Selección

La selección se realiza por torneo. El tamaño de este torneo puede predefinirse y se ha mantenido en un 7% de la población inicial. Durante este torneo, se eligen a varios participantes y estos se enfrentan en función de su fitness. Este fitness se obtiene con la función `fx_fitness_gym()`. El programa permite definir la profundidad mínima de la solución, por tanto la selección solo se efectuará entre aquellos individuos que cumplan esta condición. Todo el código de Karoo-GP puede encontrarse en su repositorio de GitHub [26]

## Opciones

El software al inicializarlo permite elegir el método de crecimiento del árbol del modelo, su profundidad inicial, el número de nodos mínimo, el tamaño de la población inicial y el número máximo de generaciones. Además, permite seleccionar la forma de visualizar la ejecución.



```

**  **  *****  *****  *****  *****  *****  *****
**  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **
**  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **
****  *****  *****  **  **  **  **  **  **  **  **  **
**  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **
**  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **
**  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **
**  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **  **
**  **  **  **  **  **  **  *****  *****  *****  **

Genetic Programming in Python with TensorFlow - by Kai Staats, version 2.3

Select (c)lassification, (r)egression, (m)atching, or (p)lay (default m): r
Select (f)ull, (g)row, or (r)amped 50/50 method (default r): r
Enter depth of the initial population of Trees (default 3): 5
Enter maximum Tree depth (default 5): 10
Enter minimum number of nodes for any given Tree (default 3; max 63): 6
Enter number of Trees in each population (default 100): 1000
Enter max number of generations (default 10): 50
Display (i)nteractive, (g)eneration, (m)iminal, (s)ilent, or (d)e(b)ug (default m):
```

Ilustración 10. Captura de la ejecución de Karoo GP

El programa al final nos da los individuos que mejor fitness han obtenido.

```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
Tree 967 yields (sym): D + Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As) - L
Tree 968 yields (sym): D + Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As) - Fy + sqrt(L)*square(Fy)/square(D) - L**3/square(As) - L*square(Fc)/square(As) - Fc*Fy/(sqrt(As)*s
sqrt(t))
Tree 969 yields (sym): D - sqrt(Fc)*L**3*square(t)/square(L) + Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As) - Fy*L**2/square(As) + sqrt(L)*square(Fy)
Tree 970 yields (sym): sqrt(As) + D + Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As) - square(Fc) - Fc/sqrt(As) - L/(sqrt(As)*square(As))
Tree 971 yields (sym): D + Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As) - Fy*L**2/square(As) - Fy + sqrt(L)*square(Fy)/square(D) - L**2
Tree 972 yields (sym): Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As) - Fy*L**3/square(As)**2 - Fy*L**2/square(As) + Fy*L + sqrt(L)*square(Fy)
Tree 973 yields (sym): -Ac*L/square(As) + D - Fy**2*L**3/(square(As)*square(L)) - Fy**2*L/square(As) + Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As) + sqrt(L)*square(Fy)
Tree 974 yields (sym): -Ac*L/square(As) + D - Fy**3*L**2/(square(As)*square(Fy)) - Fy**2*L/square(As) + Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As) + sqrt(L)*square(Fy)
Tree 975 yields (sym): sqrt(As) + D + L**(3/2)*square(Fy) - square(Fc) - Fc/sqrt(As) - sqrt(Fc)*L**(3/2)*square(t)/(sqrt(As)*sqrt(As)*square(As))
Tree 976 yields (sym): D + Fy**(3/2)*L**2*square(Fy)/square(As)**2 - 2*Fy*L**2/square(As) + sqrt(L)*square(Fy)
Tree 977 yields (sym): sqrt(As) + D + Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As) - Fy*L**2/square(As) - square(Fc) - Fc/sqrt(As) - sqrt(Fc)*L**(3/2)*square(t)/(sqrt(As)*s
sqrt(As)*square(As))
Tree 978 yields (sym): D + Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As) - Fy*L**2/square(As)
Tree 979 yields (sym): D - sqrt(Fc)*L*square(t)/sqrt(Fy) + Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As) - square(Fc) - Fc/sqrt(As)
Tree 980 yields (sym): sqrt(As)*Fy*L/square(As) + D - 2*Fy*L**2/square(As) + sqrt(L)*square(Fy) + L/sqrt(As)
Tree 981 yields (sym): D + Fc*Fy*sqrt(L)*square(Fy)/square(As) - Fy*L**2/square(As) - Fy + sqrt(L)*square(Fy)/square(D) - L**3/square(As)
Tree 982 yields (sym): -sqrt(D)*L/sqrt(Fy) + D - Fc*L + Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As) - Fy*L**2/square(As) - Fy + sqrt(L)*square(As)/square(As) - D*L/(As*squ
square(As))
Tree 983 yields (sym): D + Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As) - Fy*L**2/square(As) - Fy - L**3/square(As) - square(D) + square(t)
Tree 984 yields (sym): D + Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As) - Fy*L**2/square(As) - Fy - L**3/square(As) - square(D) + square(t)
Tree 985 yields (sym): -Ac*L**3/square(As)**2 - As*L + Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As) + sqrt(L)*square(Fy) + sqrt(L)*square(Fy)/square(D) - L**3/square(As)
Tree 986 yields (sym): Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As)
Tree 987 yields (sym): sqrt(As) + D + Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As) - Fy*L**2/square(As) + sqrt(L)*square(Fy) - L**2*square(Fc)/square(As) - Fc/sqrt(As) - L
/(sqrt(As)*sqrt(As))
Tree 988 yields (sym): D + Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As) - L
Tree 989 yields (sym): D + Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As) - Fy*L**2/square(As) - Fy*L/square(As) - Fy - L**3/square(As)
Tree 990 yields (sym): D + Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As) - Fy - L**3/square(As) + L*square(D) - square(D)
Tree 991 yields (sym): Fy**2*L/square(As)
Tree 992 yields (sym): sqrt(As) + D*sqrt(L)*square(Fy) - Fy*L**2/square(As) + Fy*L + L**(3/2)*square(Fy)/square(As) + sqrt(L)*square(Fy) - L**3/square(As) - squ
are(Fc) - Fc/sqrt(As) - sqrt(Fc)*L**(3/2)*square(t)/(sqrt(As)*sqrt(As)*square(As))
Tree 993 yields (sym): -sqrt(As)*Fy/square(L) + Ac + D + Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As) + sqrt(L) - square(Fc) - Fc/sqrt(As) - sqrt(Fc)*L**(3/2)*square(t)/(s
sqrt(As)*square(As))
Tree 994 yields (sym): D - Fy**2*L/square(As) + Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As) - Fy + sqrt(L)*square(Fy)/square(D) - L**3/square(As) - square(L)/sqrt(L)
Tree 995 yields (sym): -Ac*L + D + Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As)
Tree 996 yields (sym): sqrt(As) + D + Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As) - square(Fc) - square(Fc)/square(As) - L/sqrt(As) - sqrt(L)*square(t)/(sqrt(As)*sqrt(Fc)
*sqrt(Fy))
Tree 997 yields (sym): D + Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As) - 2*Fy*L**2/square(As) - Fy - square(D) + square(t)
Tree 998 yields (sym): As/square(Fy) + Fy*L**(3/2)*square(L)/square(As) - 2*Fy*L**2/square(As) - t + square(D)
Tree 999 yields (sym): 2*sqrt(As) + D*sqrt(L)*square(Fy) + D - square(Fc) - square(Fc)/square(As) - 2*Fc/sqrt(As) - 2*sqrt(Fc)*L**(3/2)*square(t)/(sqrt(As)*sqrt
(As)*square(As))
Tree 1000 yields (sym): Fy*L**(3/2)*square(Fy)/square(As) + Fy*L
45 trees [ 1 2 6 8 9 13 16 20 27 29 32 33 34 41 44 49 50 51 52 53 54 56 58 62 65 66 68 70 72 77 78 80 82 88 89 93 95 96 98
99 101 120 121 142 502] offer the highest fitness scores.
```

Ilustración 11. Ejemplo de resultados obtenidos de una generación con Karoo GP

### 6.2.3. HeuristicLab [29]

Este es el software más completo y compacto de todos los que se ha utilizado en este proyecto. Permite con mucha facilidad realizar ejecuciones y alimentar bases de datos sin previo tratamiento como sí que necesitaban las anteriores. Además, permite exportar los resultados de manera muy simple y completa para su futuro análisis.

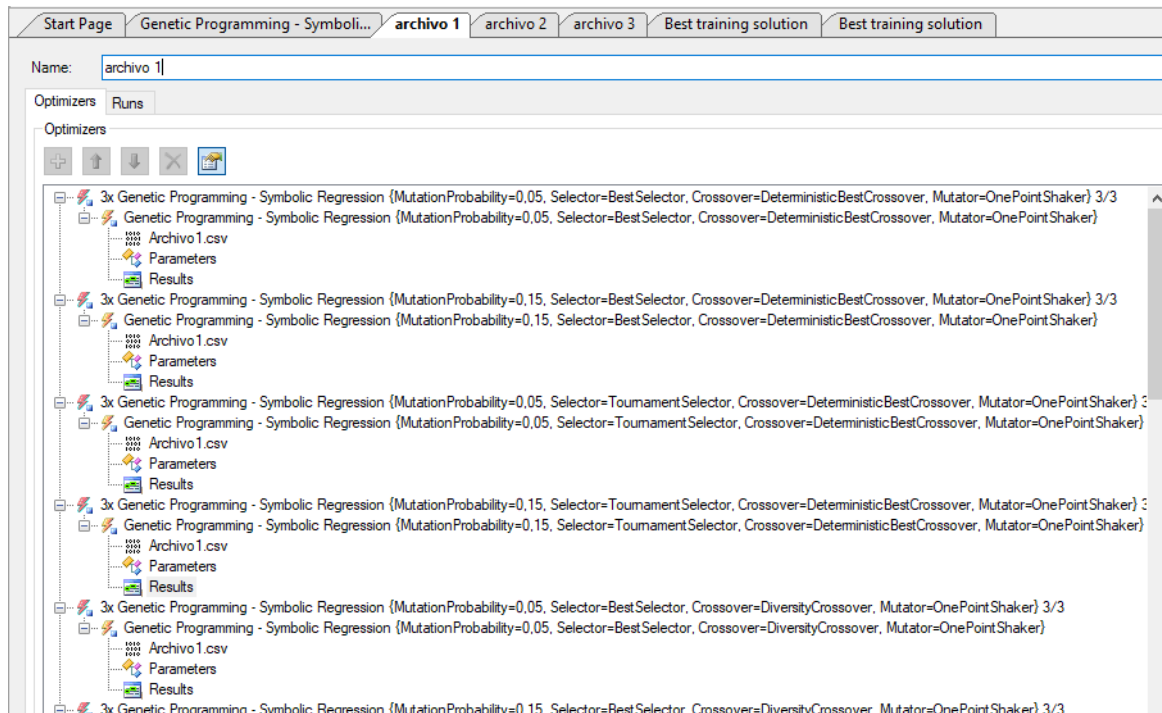


Ilustración 12. Captura del software HeuristicLab



## 7. Test

Para poder realizar los test, lo primero es preparar el archivo .csv con la variables que queremos utilizar. Se van a realizar diferentes configuraciones para ver cómo afectan esas variables.

El primer archivo incluirá todas las variables ( $D$ ,  $t$ ,  $f_y$ ,  $f_c$ ,  $L$ ) y además se incluirán las áreas de la sección de acero y hormigón ( $A_s$ ,  $A_c$ ). En este archivo se incluirán todos los ensayos de la base de datos inicial (anexo 1).

El segundo y tercer archivo incluirán de nuevo todas las variables pero se los ensayos se dividirán en  $f_c \leq 50$  MPa y  $f_c > 50$  MPa, obteniendo dos nuevos archivos para los test.

Para cada archivo se realizarán diferentes test variando la probabilidad y tipo de mutación y el tipo de selección y cruce. Para estos test se utilizará una población inicial y un número de generaciones relativamente reducidos. La población inicial será de 1000 y habrá 50 generaciones. Con este número de generaciones se espera poder valorar si la combinación de parámetros y variables es adecuada. Además, cada test se repetirá un mínimo de 3 veces para asegurar el resultado.

Una vez obtenidos estos datos se realizará un nuevo test con el software, los parámetros y las variables que mejores resultados hayan dado. Para este test el número de generaciones y el tamaño de la población inicial serán bastante superiores para asegurar la convergencia.

## 7.1. Ronda de test con Karoo-GP

En el caso de Karoo-GP, para cada archivo se dividirán los test en función de los operadores numéricos utilizados y el tipo de evolución del árbol. En la realización de los test previos se ha visto que el resto de parámetros no influyen mucho mientras se mantengan en valores lógicos.

Por tanto, para cada archivo se realizarán cuatro test con condiciones diferentes.

Archivo	Operadores	Evolución del árbol
1.1	Básicos	Full
1.2	Complejos	Full
1.3	Básicos	Ramped 50/50 method
1.4	Complejos	Ramped 50/50 method

Archivo	Operadores	Evolución del árbol
2.1	Básicos	Full
2.2	Complejos	Full
2.3	Básicos	Ramped 50/50 method
2.4	Complejos	Ramped 50/50 method

Archivo	Operadores	Evolución del árbol
3.1	Básicos	Full
3.2	Complejos	Full
3.3	Básicos	Ramped 50/50 method
3.4	Complejos	Ramped 50/50 method

*Tabla 1. Test a realizar con Karoo GP*

Los operadores básicos están formados por suma, resta, multiplicación y división. Los operadores complejos por los básicos más raíz cuadrada, logaritmo en base diez, logaritmo neperiano, seno, coseno y tangente.

### 7.1.1. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos para el archivo 1 son los siguientes:

Para el test 1.1 se ha obtenido una fórmula muy sencilla. Curiosamente esta fórmula no incluye  $f_c$ , por lo que ya a priori podemos suponer que va a dar problemas.

$$N_{1.1} = Ac \frac{\delta}{t} + 2Ac + \frac{2Ac}{t} + As * D * f_c * t + 2As + 2D\delta + 2Dt - 2\frac{D}{t} - \frac{fy}{t} + \frac{fy}{\delta} + 4\delta + 3t - \frac{t}{Ac}$$

Donde  $\delta = (Aa * fy * 1000) / N_{plRd}$

$N_{plRd} = (Aa * fy + Ac * f_c) * 1000$

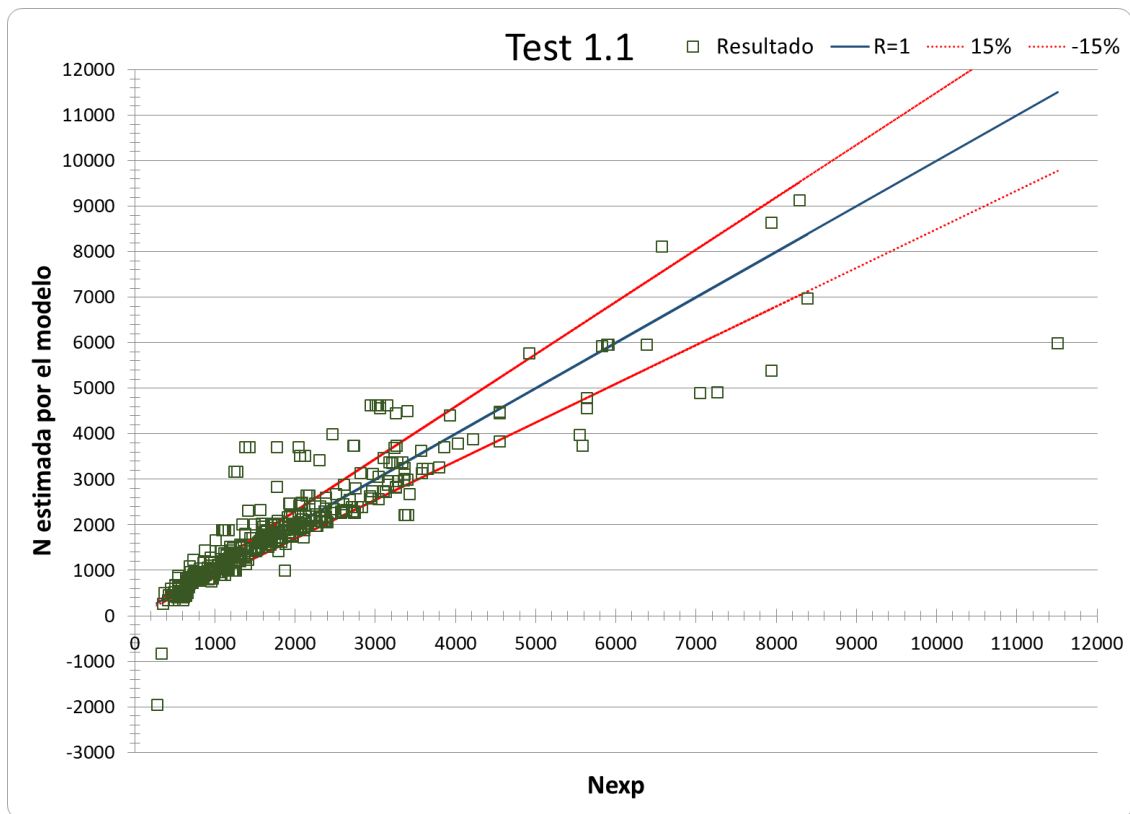


Ilustración 13. Resultados de los ensayos contra resultados del modelo obtenido en el test Test 1.1 con Karoo GP

Promedio	0,98
Max	1,92
Min	0,14
Desviación estándar	0.20

Tabla 2. Resultados de  $N_{exp}/N$  estimada por el Test 1.1 con Karoo GP

La tabla 2 muestra que aunque el promedio está dentro del rango que se había marcado como aceptable, la desviación es importante y en ciertos casos da resultados negativos, como se puede observar en la ilustración 13, lo cual carece de sentido.

Para el test 1.2 se obtienen peores resultados que para el test anterior. En la tabla 3 se observa que la desviación estándar se encuentra muy por encima del límite establecido inicialmente.

$$N_{1.2} = 4D + Fc + \delta + D * \log(1 + Fc) + 4D - 3Fy\delta + Fyt - 2Fy + 2\delta + 2t * \log(1 + Fy) * \log(Ac) - \log(1 + As) * \log(1 + Fy) - \log(1 + D) * 2 * \log(1 + Fc) * \log(1 + \delta) - 2 * \log(1 + D) + \log(1 + Fy) - 3 * \log(1 + t) + 2 * \log(1 + t) - 2$$

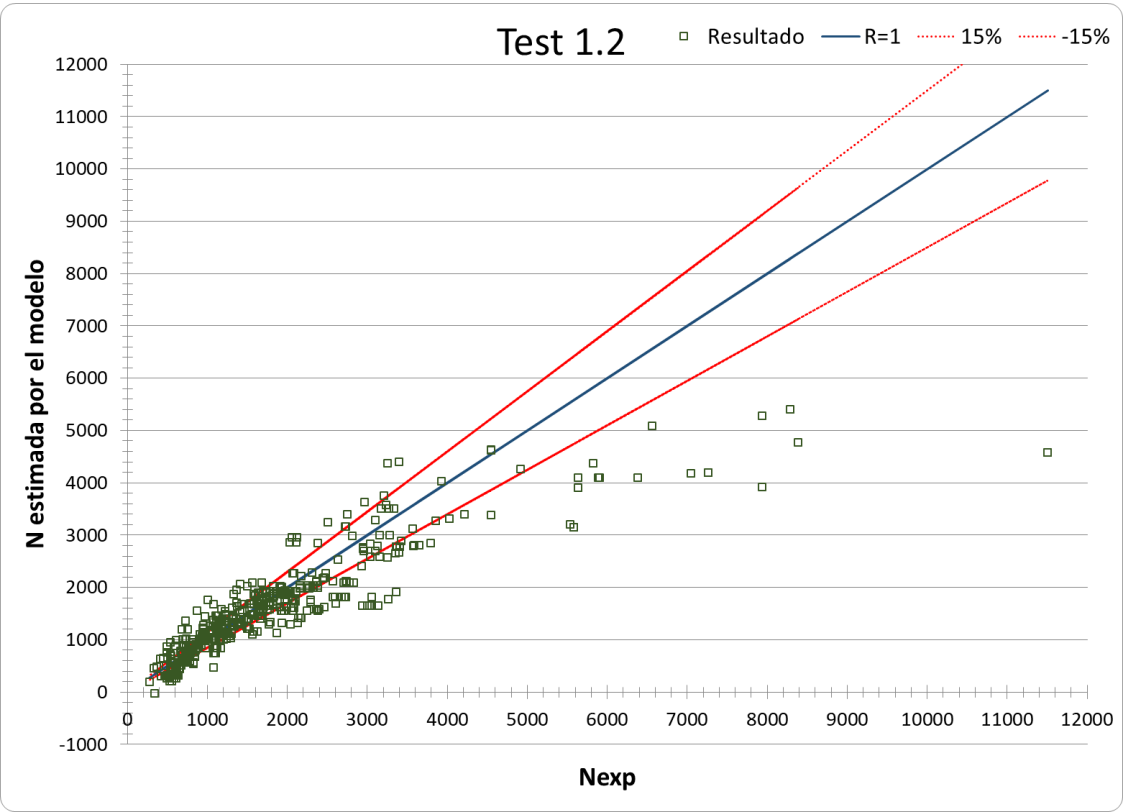


Ilustración 14. Resultados de los ensayos contra resultados del modelo obtenido en el test Test 1.2 con Karoo GP

Promedio	1,15
Max	14,68
Min	0,53
Desviación estándar	0.69

Tabla 3. Resultados de Nexp/N estimada por el Test 1.2 con Karoo GP

Para el test 1.3 también se obtiene una desviación estándar muy importante, tabla 4, y el modelo no se adapta a los valores de altas resistencias como se puede observar la ilustración 15.

$$N_{1.3} = 1.5(\sqrt{Ac} - \sqrt{As} - 3 * \sqrt{D} * \log(1 + D) + D * \log(1 + D) + D * \log(1 + Fc) + 3Fc + \sqrt{Fy} * (t^2) - 2\sqrt{Fy} + \log(1 + Ac) + \log(1 + As) * D^2 - \log(1 + Fc) + 4\log(1 + t) + \log(\delta) - \log(t) + \frac{D^2}{Fy})$$

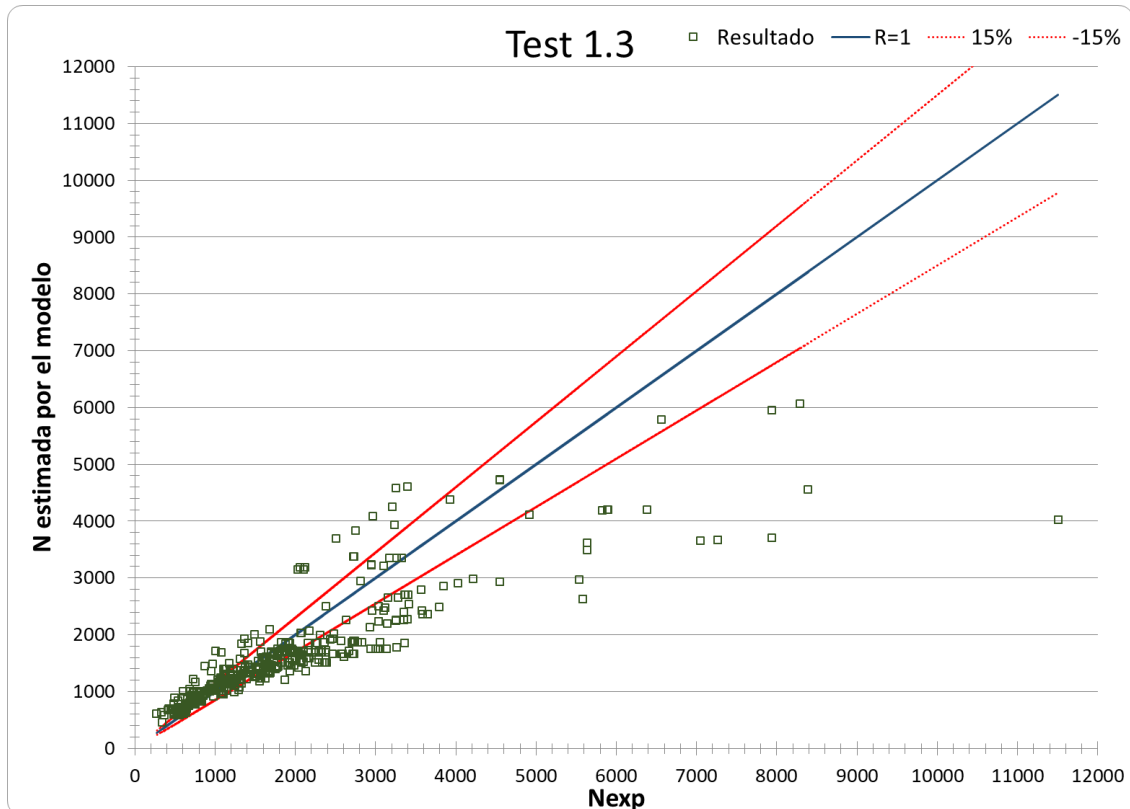


Ilustración 15. Resultados de los ensayos contra resultados del modelo obtenido en el test Test 1.3 con Karoo GP

Promedio	1,09
Max	2,86
Min	0,45
Desviación estándar	0.31

Tabla 4. Resultados de  $N_{exp}/N$  estimada por el Test 1.3 con Karoo GP

El test 1.4 es el que ha obtenido mejor resultado de los 4. Aun así la desviación estándar, tabla 5, es superior a la que se había establecido como objetivo al inicio del proyecto.

$$N_{1.4}= 1.3(\sqrt{Ac} * \log(1 + Ac) * D^2 + \sqrt{Ac} * Fc^2 + 2\sqrt{As} + \sqrt{\frac{As}{Fc}} + t\sqrt{D}t + \sqrt{D} * \log(As) - \sqrt{D} * Ac^2 * \frac{seno(t)}{Fy} - \sqrt{D} * \frac{\log(Fy)}{Fy} + D * t + D * \log(1 + D) + 2 * \sqrt{Fc} * \log(As) + \log(1 + Ac) + 2 * \log(1 + Ac) * \frac{\tan(Ac)}{Ac^2*cos(Fc)} + \log(1 + Fc) - \log(1 + Fy) - \frac{3\log(1+Fy)}{\log(As)} + \log(1 + \delta) - Ac^2 * seno(Fy) + \log(As) + \frac{\log(Fy)}{seno(D)} + seno(Fc) - cos(As))$$

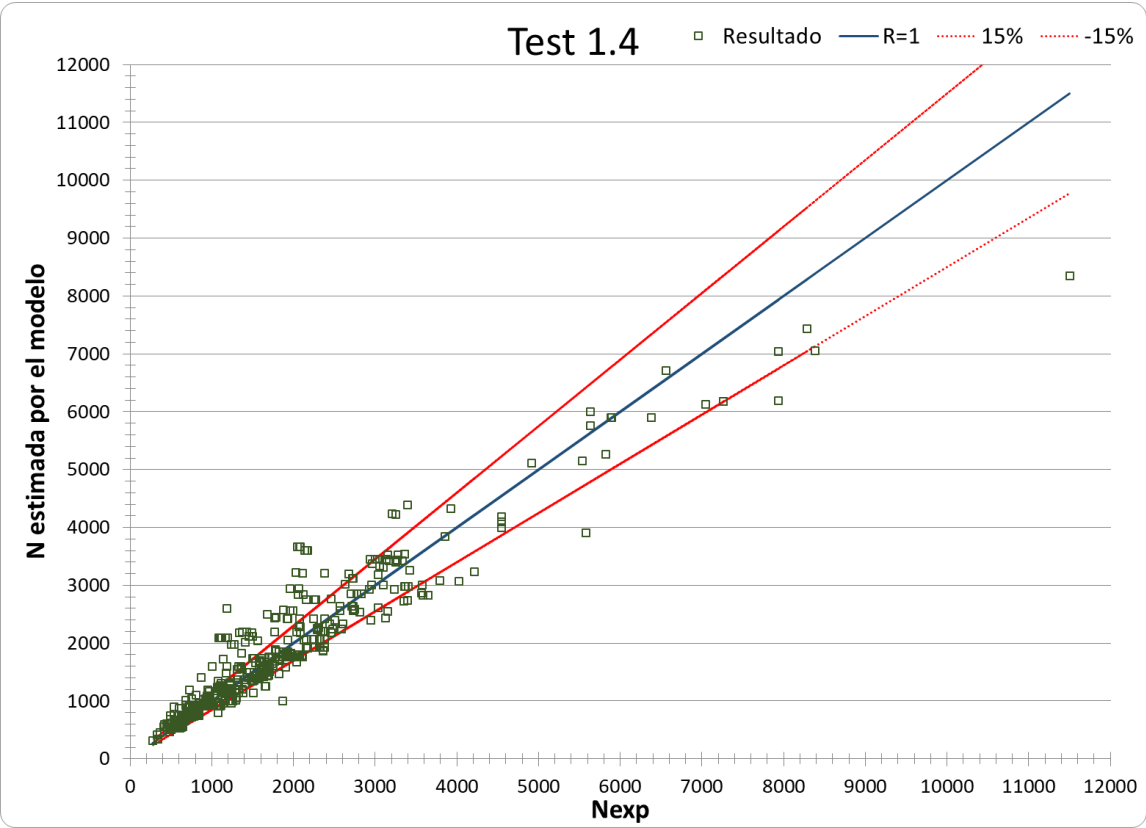


Ilustración 16. Resultados de los ensayos contra resultados del modelo obtenido en el test Test 1.4 con Karoo GP

Promedio	0,99
Max	1,88
Min	0,46
Desviación estándar	0.18

Tabla 5. Resultados de Nexp/N estimada por el Test 1.4 con Karoo GP

Tras realizar los test para el primer archivo se puede apreciar fácilmente que el modelo no se adapta a los datos experimentales, aunque sí que se aprecia una tendencia.

Visto los resultados obtenidos con el software HeuristicLabs, mostrado a continuación, se decide parar los test con este software y realizar primero todos los test con HeuristicLabs para ver si se obtiene mejores resultados.

## 7.2. Ronda de test con HeuristicLab

En el caso del software HeuristicLab, se realizarán un total de 16 test diferentes a cada archivo, un mínimo de 3 veces cada test. Se variará el tipo de cruce o crossover entre:

- *Deterministic-best crossover*: donde el punto de inserción en el padre A1 es fijo, y el algoritmo buscará la mejor elección para los nodos disponibles en el padre A2.
- *Diversity crossover*: Va cambiando el nodo donde se realiza la inserción.

El tipo de selección entre dos métodos anteriormente explicados:

- *Best selector* o selección elitista.
- *Tournament selector* o selección por torneo.

El tipo de mutación entre:

- *One point shaker*: Se cambia únicamente un alelo del individuo.
- *Full tree shaker*: Se cambia uniformemente los alelos del individuo.

La probabilidad de mutación, la cual varía entre:

- 0.049
- 0.15

Para entrenar al algoritmo se utilizará el 67% de los valores de la base de datos que le corresponda, y el 33% restante se utilizará para testear el modelo.

Por tanto, para el archivo 1 se efectuarán los test como muestra la tabla 6, para el archivo 2 como muestra la tabla 7 y para el archivo 3 como muestra la tabla 8.



Archivo	1		Crossover	Selección	Mutación	
Nº de archivo	Nº generaciones	Tamaño población	Tipo	Tipo	Tipo	Probabilidad
1.1	50	1000	Deterministic	Best selector	One point shaker	0,049
1.2	50	1000	Deterministic	Best selector	One point shaker	0,15
1.3	50	1000	Deterministic	Tournament Selector	One point shaker	0,049
1.4	50	1000	Deterministic	Tournament Selector	One point shaker	0,15
1.5	50	1000	Diversity	Best selector	One point shaker	0,049
1.6	50	1000	Diversity	Best selector	One point shaker	0,15
1.7	50	1000	Diversity	Tournament Selector	One point shaker	0,049
1.8	50	1000	Diversity	Tournament Selector	One point shaker	0,15
1.9	50	1000	Deterministic	Best selector	Full tree shaker	0,049
1.10	50	1000	Deterministic	Best selector	Full tree shaker	0,15
1.11	50	1000	Deterministic	Tournament Selector	Full tree shaker	0,049
1.12	50	1000	Deterministic	Tournament Selector	Full tree shaker	0,15
1.13	50	1000	Diversity	Best selector	Full tree shaker	0,049
1.14	50	1000	Diversity	Best selector	Full tree shaker	0,15
1.15	50	1000	Diversity	Tournament Selector	Full tree shaker	0,049
1.16	50	1000	Diversity	Tournament Selector	Full tree shaker	0,15

*Tabla 6. Test a realizar con HeuristicLab para el archivo 1*

Archivo	2		Crossover	Selección	Mutación	
Nº de archivo	Nº generaciones	Tamaño población	Tipo	Tipo	Tipo	Probabilidad
2.1	50	1000	Deterministic	Best selector	One point shaker	0,049
2.2	50	1000	Deterministic	Best selector	One point shaker	0,15
2.3	50	1000	Deterministic	Tournament Selector	One point shaker	0,049
2.4	50	1000	Deterministic	Tournament Selector	One point shaker	0,15
2.5	50	1000	Diversity	Best selector	One point shaker	0,049
2.6	50	1000	Diversity	Best selector	One point shaker	0,15
2.7	50	1000	Diversity	Tournament Selector	One point shaker	0,049
2.8	50	1000	Diversity	Tournament Selector	One point shaker	0,15
2.9	50	1000	Deterministic	Best selector	Full tree shaker	0,049
2.10	50	1000	Deterministic	Best selector	Full tree shaker	0,15
2.11	50	1000	Deterministic	Tournament Selector	Full tree shaker	0,049
2.12	50	1000	Deterministic	Tournament Selector	Full tree shaker	0,15
2.13	50	1000	Diversity	Best selector	Full tree shaker	0,049
2.14	50	1000	Diversity	Best selector	Full tree shaker	0,15
2.15	50	1000	Diversity	Tournament Selector	Full tree shaker	0,049
2.16	50	1000	Diversity	Tournament Selector	Full tree shaker	0,15

*Tabla 7. Test a realizar con HeuristicLab para el archivo 2*

Archivo	3		Crossover	Selección	Mutación	
Nº de archivo	Nº generaciones	Tamaño población	Tipo	Tipo	Tipo	Probabilidad
3.1	50	1000	Deterministic	Best selector	One point shaker	0,049
3.2	50	1000	Deterministic	Best selector	One point shaker	0,15
3.3	50	1000	Deterministic	Tournament Selector	One point shaker	0,049
3.4	50	1000	Deterministic	Tournament Selector	One point shaker	0,15
3.5	50	1000	Diversity	Best selector	One point shaker	0,049
3.6	50	1000	Diversity	Best selector	One point shaker	0,15
3.7	50	1000	Diversity	Tournament Selector	One point shaker	0,049
3.8	50	1000	Diversity	Tournament Selector	One point shaker	0,15
3.9	50	1000	Deterministic	Best selector	Full tree shaker	0,049
3.10	50	1000	Deterministic	Best selector	Full tree shaker	0,15
3.11	50	1000	Deterministic	Tournament Selector	Full tree shaker	0,049
3.12	50	1000	Deterministic	Tournament Selector	Full tree shaker	0,15
3.13	50	1000	Diversity	Best selector	Full tree shaker	0,049
3.14	50	1000	Diversity	Best selector	Full tree shaker	0,15
3.15	50	1000	Diversity	Tournament Selector	Full tree shaker	0,049
3.16	50	1000	Diversity	Tournament Selector	Full tree shaker	0,15

Tabla 8. Test a realizar con HeuristicLab para el archivo 3

### 7.2.1. Test archivo 1

Como se ha especificado anteriormente, el archivo 1 incluye todas las variables (D, t, fy, fc, L) y las áreas de la sección de acero y hormigón (As, Ac). Además este archivo incluye todos los ensayos de la base de datos inicial (anexo 1). La tabla 9 muestra los resultados obtenidos tras los test.

Archivo	Resultado					
Nº de archivo	Error relativo medio (test)	Error relativo medio (entrenamiento)	Model Depth	Model Length	R <sup>2</sup> de Pearson (test)	R <sup>2</sup> de Pearson (entrenamiento)
1.1	11,47%	9,78%	14	36	0,9645	0,9640
1.2	10,57%	9,90%	14	81	0,9736	0,9705
1.3	9,81%	8,64%	14	95	0,7767	0,9749
1.4	9,45%	8,65%	14	83	0,9550	0,9736
1.5	17,41%	16,58%	14	30	0,9523	0,9177
1.6	13,77%	15,04%	12	61	0,9482	0,9326
1.7	9,51%	10,81%	14	139	0,9481	0,9603
1.8	10,89%	9,85%	14	62	0,9478	0,9699
1.9	8,27%	9,98%	14	55	0,9797	0,9672
1.10	10,20%	9,82%	14	71	0,9770	0,9683
1.11	21,38%	7,90%	14	131	0,7354	0,9826
1.12	7,69%	8,12%	14	112	0,9158	0,9778
1.13	11,63%	11,49%	8	19	0,9319	0,9436
1.14	25,44%	23,47%	11	26	0,9161	0,8860
1.15	11,13%	10,59%	14	62	0,9693	0,9598
1.16	10,73%	9,90%	14	75	0,9659	0,9664

Tabla 9. Resumen de resultados de los test del archivo 1 con HeuristicLab



Donde,

$$D = A \quad A_c = E$$

$$t = B \quad A_s = F$$

$$f_y = C \quad L = G$$

$$f_c = D$$

Si reducimos el modelo para que sea más inteligible quedaría:

$$N_{1.12} = \frac{2.13Ac^2 - 0.204fc + e^{\frac{-0.042Fc^3}{L}}}{2.038(t + fc)\left(\left(1.33fy + \frac{4.007}{0.045Fc} + 0.016\right) + 0.204fc - \frac{11.404}{(-0.204Fc + 16.859)(Ln(2.236fcL + 1.477L))}\right)} \\ + \frac{1.33Fy + 0.024L}{2.037t - \frac{e^{1.926Ac - 1.07}}{1.887As}} - Ln(1.33fy) + 2.06Ac\left(2.037t + \left(+0.204fc + \frac{0.04fc^2}{0.16L}\right) + 0.597fc\right) \\ + Ln\left(\frac{1.33fy - \frac{0.04fy^2}{0.204fc + 0.199D}}{13} + 1.33fy + \frac{0.157L}{2.037t - 0.597Fc} + 1.477L\right) 554.674 - 591.149$$

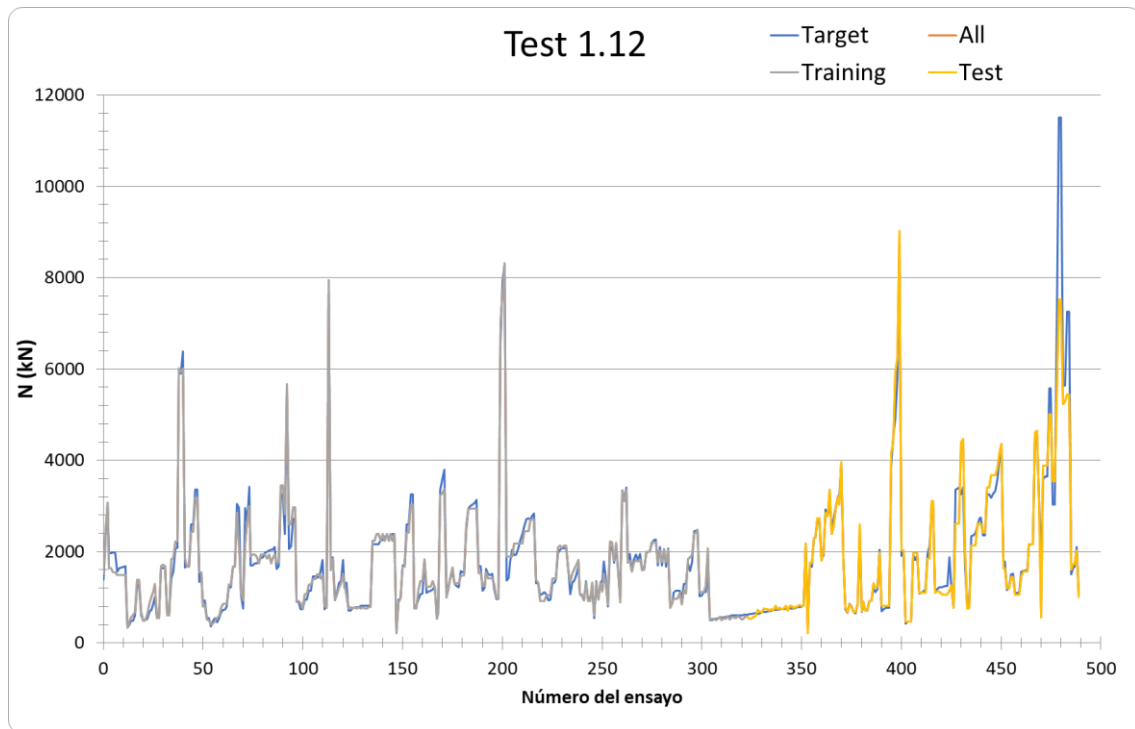


Ilustración 18. Gráfica de los resultados obtenidos con el modelo1.12 para cada ensayo y su valor experimental

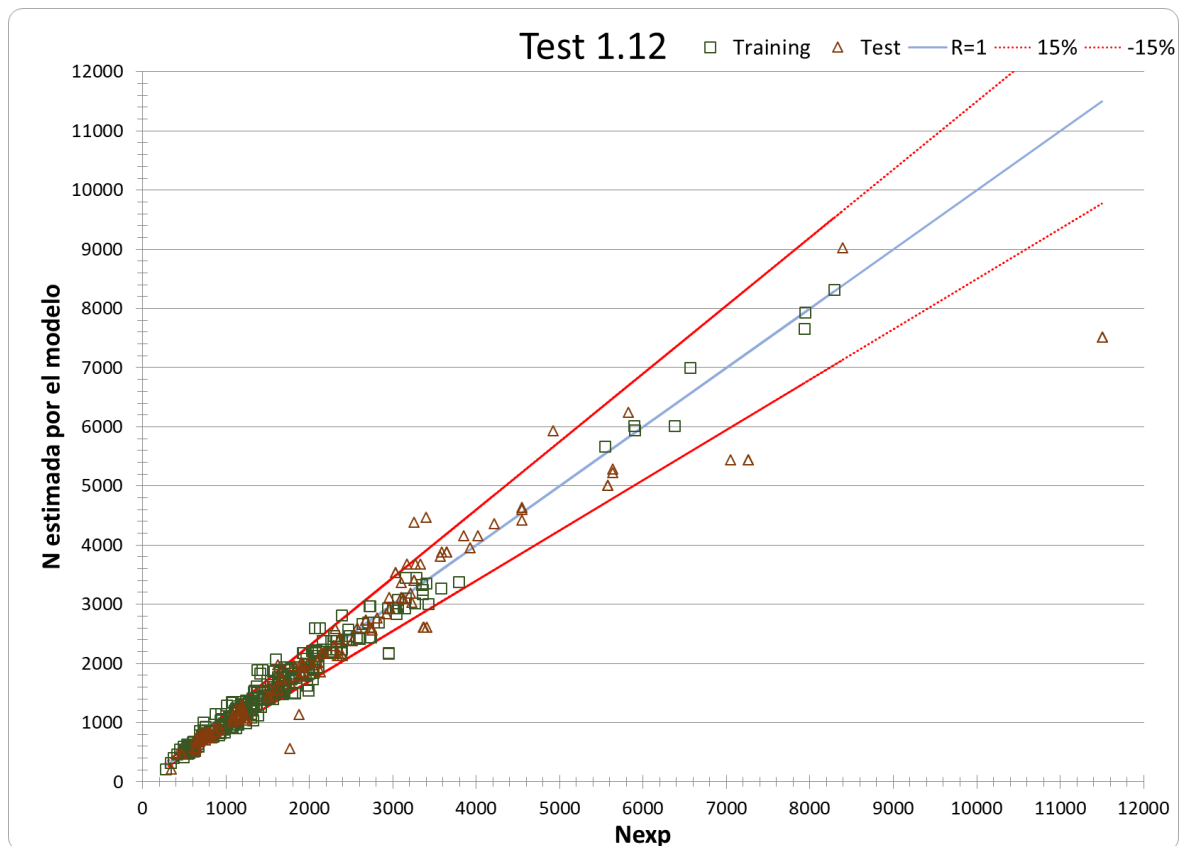


Ilustración 19. Resultados de los ensayos contra resultados del modelo obtenido en el test 1.12 con HeuristicLab

Promedio	1,01
Max	3,15
Min	0,72
Desviación estándar	0.15

*Tabla 10. Resultados de  $N_{exp}/N$  estimada por el Test 1.12 con HeuristicLab*

Las ilustraciones 18 y 19 muestran como el modelo consigue predecir con bastante exactitud la capacidad seccional a excepción de los casos más extremos. Por ejemplo el caso de máxima desviación relativa, 3.15, corresponde a un caso donde el hormigón tiene una  $f_c$  extremadamente baja:

D	t	$f_y$	$f_c$	$A_c$	$A_s$	L	$N_{exp}$	N modelo
238	4,54	507	0,10	0,041158	0,00333	714	1768	561,712

*Tabla 11. Ensayo con  $f_c=0.1$  MPa*

La tabla 11 muestra como modelo no consigue adaptarse a esta situación,  $f_c=0.1$  MPa, y predice una capacidad seccional muy inferior.



## 7.2.2. Test archivo 2

Archivo	Resultado					
Nº de archivo	Error relativo medio (test)	Error relativo medio (entrenamiento)	Model Depth	Model Length	R <sup>2</sup> de Pearson (test)	R <sup>2</sup> de Pearson (entrenamiento)
2.1	10,68%	8,53%	14	115	0,9723	0,9779
2.2	10,19%	9,22%	14	56	0,9764	0,9768
2.3	10,03%	8,01%	14	112	0,9764	0,9826
2.4	11,86%	7,96%	14	71	0,9709	0,9811
2.5	11,90%	10,98%	14	27	0,9590	0,9604
2.6	10,00%	11,77%	14	42	0,9521	0,9519
2.7	9,93%	9,09%	14	66	0,9732	0,9752
2.8	11,79%	8,43%	14	99	0,9758	0,9778
2.9	10,94%	9,53%	14	67	0,9720	0,9767
2.10	10,33%	8,29%	13	69	0,9680	0,9758
2.11	10,33%	7,87%	14	94	0,9716	0,9808
2.12	9,59%	7,47%	14	127	0,9792	0,9864
2.13	11,81%	9,37%	14	53	0,9613	0,9705
2.14	13,68%	15,01%	8	17	0,9529	0,9321
2.15	11,37%	9,43%	14	101	0,9720	0,9744
2.16	22,48%	8,87%	14	91	0,8104	0,9781

Tabla 12. Resumen de resultados de los test del archivo 2 con HeuristicLab

En este caso el árbol del modelo es incluso más complejo que el anterior con una longitud de 127.



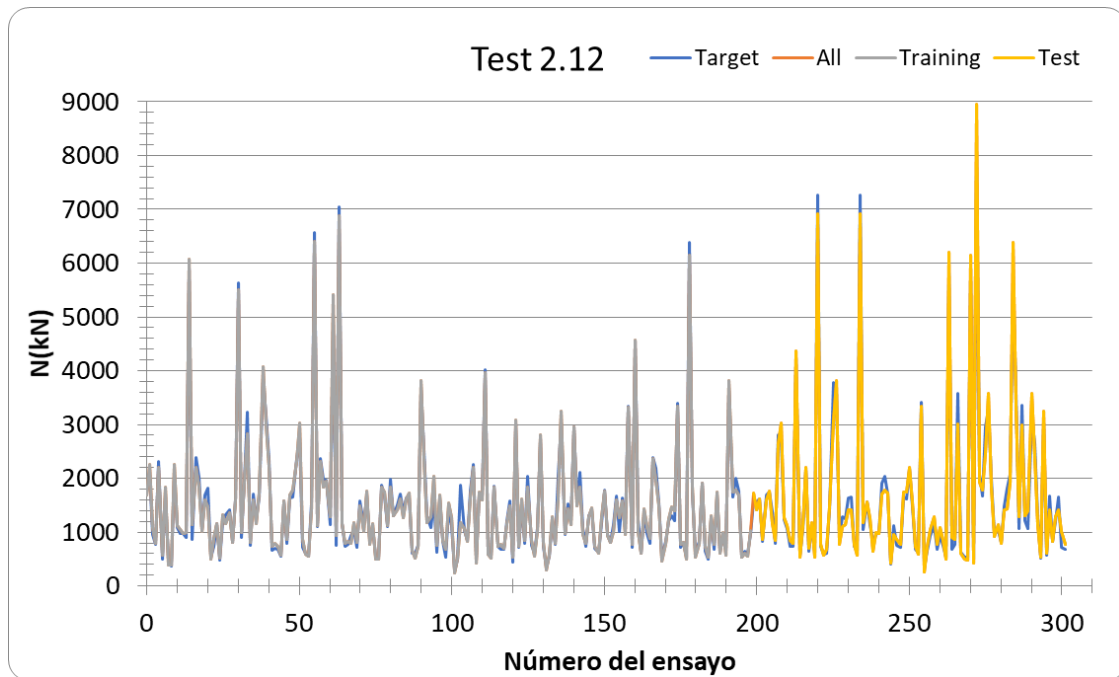


Ilustración 21. Gráfica de los resultados obtenidos con el modelo 2.12 para cada ensayo y su valor experimental

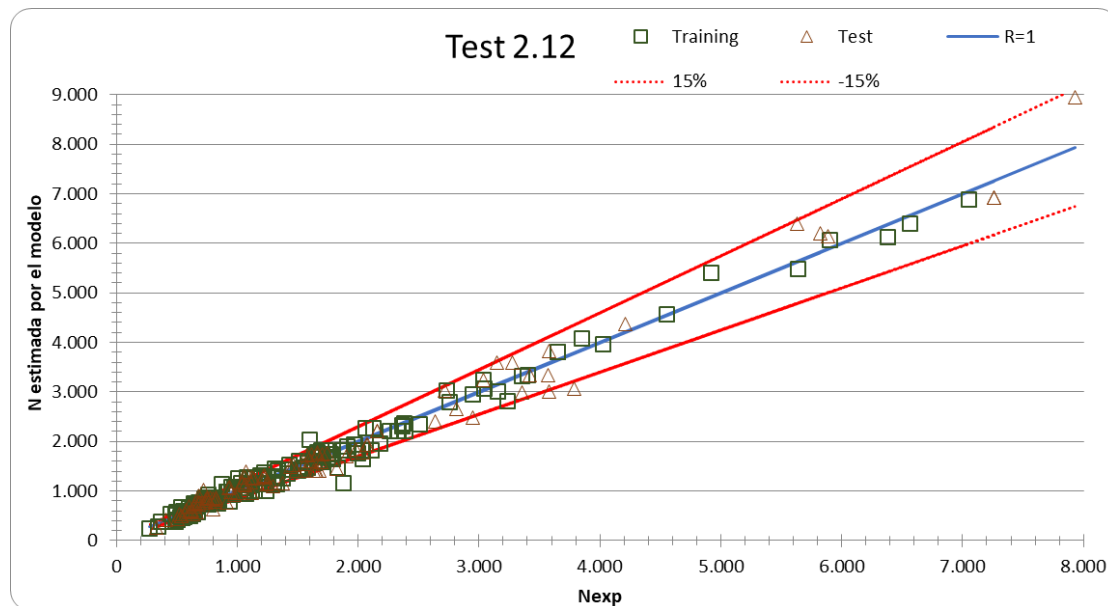


Ilustración 22. Resultado obtenido de los ensayos frente al obtenido en el test 2.12 con HeuristicLab

Promedio	1,00
Max	1,60
Min	0,71
Desviación estándar	0.11

Tabla 13. Resultados de Nex p/N estimada por el Test 2.12 con HeuristicLab

### 7.2.3. Test archivo 3

Este caso se limita la base de datos a los ensayos donde  $f_c > 50$  MPa.

Los resultados obtenidos en los diferentes test del archivo 3 son los siguientes:

Archivo	Resultado					
Nº de archivo	Error relativo medio (test)	Error relativo medio (entrenamiento)	Model Depth	Model Length	R <sup>2</sup> de Pearson (test)	R <sup>2</sup> de Pearson (entrenamiento)
3.1	11,84%	7,18%	13	34	0,7949	0,9904
3.2	8,14%	6,99%	14	27	0,8411	0,9898
3.3	10,89%	5,94%	14	142	0,8248	0,9937
3.4	9,08%	6,25%	14	131	0,8230	0,9940
3.5	9,81%	9,32%	13	35	0,8130	0,9850
3.6	18,30%	17,77%	8	16	0,4420	0,9628
3.7	15,12%	8,34%	14	90	0,7575	0,9879
3.8	12,79%	6,85%	14	63	0,7685	0,9907
3.9	8,95%	6,92%	14	80	0,8077	0,9906
3.10	9,07%	6,57%	10	26	0,8084	0,9911
3.11	13,71%	5,56%	14	127	0,5669	0,9947
3.12	13,78%	5,40%	14	152	0,6433	0,9960
3.13	12,66%	14,84%	13	36	0,7950	0,9703
3.14	11,13%	9,01%	11	29	0,8642	0,9728
3.15	8,75%	7,12%	14	87	0,8072	0,9911
3.16	9,65%	6,55%	14	95	0,7873	0,9923

Tabla 14. Resumen de resultados de los test del archivo 3 con HeuristicLab



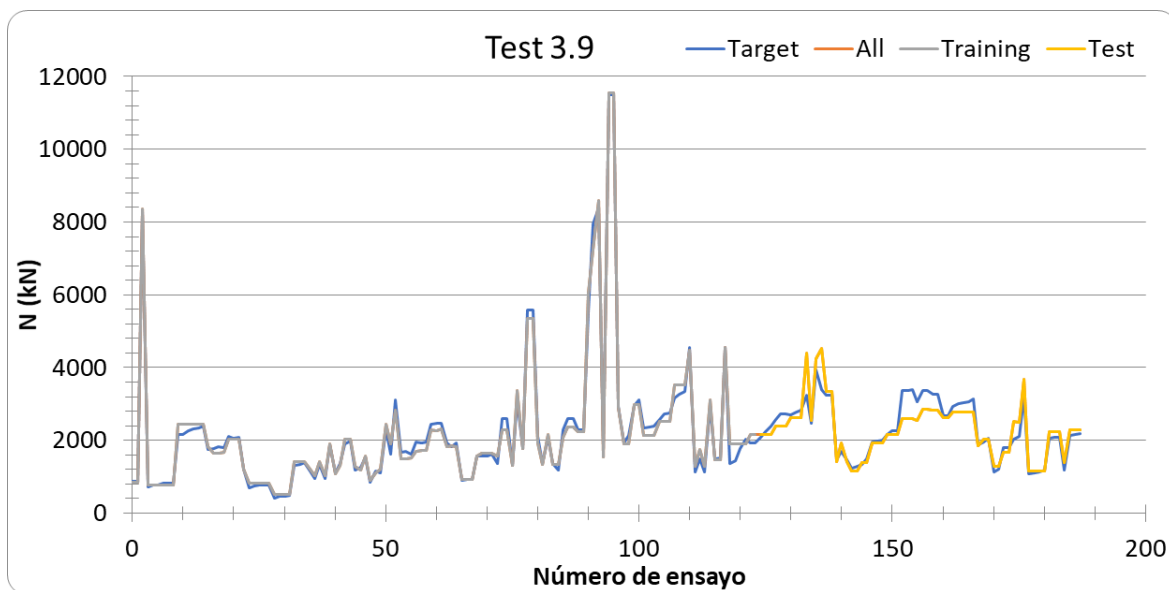


Ilustración 24. Gráfica de los resultados obtenidos con el modelo 3.9 para cada ensayo y su valor experimental

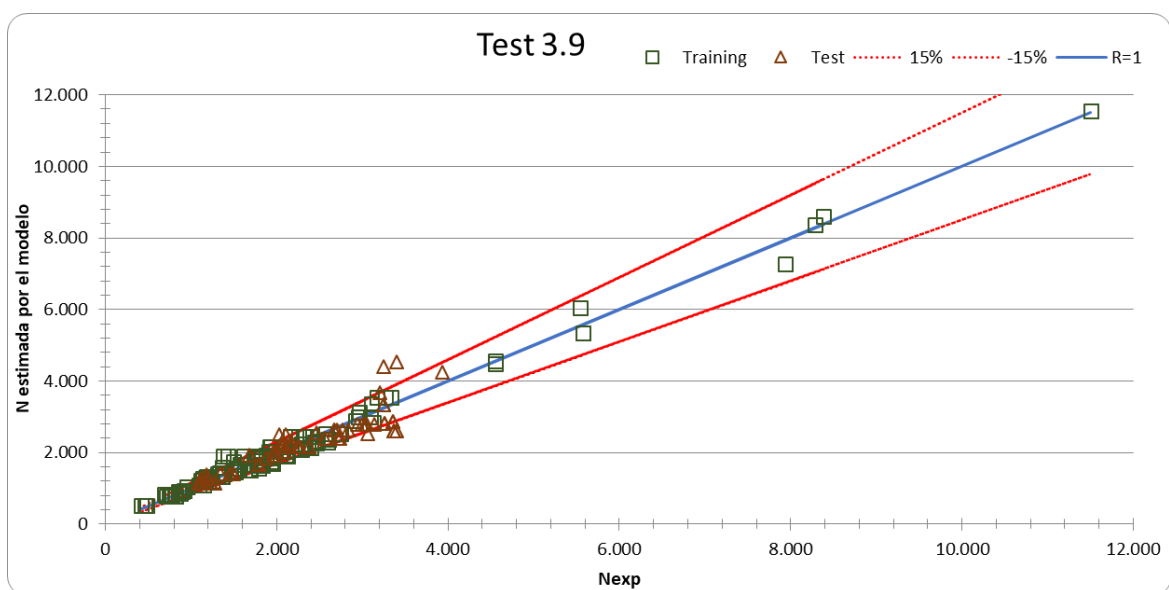


Ilustración 25. Resultado obtenido de los ensayos frente al obtenido en el test 3.9 con HeuristicLab

Promedio	1,00
Max	1,31
Min	0,72
Desviación estándar	0.10

Tabla 15. Resultados de  $N_{exp}/N$  estimada por el Test 3.9 con HeuristicLab

## 8. Evaluación de los códigos de diseño actuales

El estado actual de los códigos de diseño está muy bien expuesto en estudios anteriores [1]. Al nacer este proyecto del anterior estudio pero con la idea de llegar al método de cálculo por otra vía, en este proyecto se seguirá una estructura similar a la presentada por D. Hernández-Figueirido et al. [1], para así unificar el tipo de comparación.

Nuestros resultados se compararán con los que se obtendrían utilizando los códigos técnicos Eurocode 4, AISC, DBJ13-51, AIJ, BS5400, NBR8800 y CAN CSA. Para ello se utilizarán las fórmulas propuestas por estos modelos para obtener la capacidad seccional ( $N$ ) y compararla con la capacidad seccional experimental ( $N_{exp}$ ). Estos datos se representarán en una gráfica de  $N$  estimada por el modelo vs  $N_{exp}$  junto a unas líneas rojas que indican un intervalo de confianza de  $\pm 15\%$  de la capacidad seccional experimental ( $N_{exp}$ ). Junto a esta gráfica se representará, al igual que se ha realizado anteriormente, el valor promedio de  $N_{exp}/N_{estimada}$ , el valor máximo y mínimo de  $N_{exp}/N_{estimada}$  y la desviación estándar de  $N_{exp}/N_{estimada}$ .

La tabla 16 [1] muestra un recapitulativo de las limitaciones de cada uno de los códigos de diseño previamente presentados.

Materials			Local buckling	
	Steel	Concrete	CCFT	RCFT
EC4:2004 [4]	$235 \leq f_y \leq 460$ (MPa) $E_s = 210.000$ MPa	$25 \leq f_c \leq 50$ (MPa) $E_c = 22000 \cdot \left(\frac{f_c}{10}\right)^{0.3}$	$\frac{D}{t} \leq 90 \cdot \varepsilon^2$	$\frac{D}{t} \leq 52 \cdot \varepsilon$
AISC 2010 [7]	$f_y \leq 525$ (MPa) $E_s = 200.000$ MPa	$21 \leq f_c \leq 70$ (MPa) $E_c = 0.043 \cdot \rho^{1.5} \cdot \sqrt{f_c}$	Compact section $\lambda_p = 0.15 \cdot \frac{E_s}{f_y}$ $(\lambda_p = 127.66 \cdot \varepsilon^2)$	Compact section $\lambda_p = 2.26 \cdot \sqrt{\frac{E_s}{f_y}}$ $(\lambda_p = 65.93 \cdot \varepsilon)$
			Semislender section $\lambda_r = 0.19 \cdot \frac{E_s}{f_y}$ $(\lambda_r = 161.70 \cdot \varepsilon^2)$	Semislender section $\lambda_r = 3.00 \cdot \sqrt{\frac{E_s}{f_y}}$ $(\lambda_r = 87.52 \cdot \varepsilon)$
			Slender section $\lambda_{max} = 0.31 \cdot \frac{E_s}{f_y}$ $(\lambda_{max} = 263.83 \cdot \varepsilon^2)$	Slender section $\lambda_{max} = 5.00 \cdot \sqrt{\frac{E_s}{f_y}}$ $(\lambda_{max} = 145.86 \cdot \varepsilon)$
AS 5100-6:2004 [16]	$f_y \leq 450$ MPa $E_s = 200.000$ MPa	$25 \leq f_c \leq 65$ (MPa) $E_c = 0.043 \cdot \rho^{1.5} \cdot \sqrt{f_c}$	$\frac{D}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{250}} \leq 82$ $\left(\frac{D}{t} \leq 87.23 \cdot \varepsilon^2\right)$	$\frac{D}{t} \cdot \sqrt{\frac{f_y}{250}} \leq \begin{cases} 45 & \text{hot} \\ 40 & \text{cold} \\ 35 & \text{welded} \end{cases}$ $\left(\frac{D}{t} \leq 46.41 \cdot \varepsilon\right)$
DBJ13-51:2010 [17]	$235 \leq f_y \leq 420$ $E_s = 206.000$	$30 \leq f_{cu}^{150} \leq 90$ (MPa) $E_c = \frac{10^5}{2.2 + \frac{34.7}{\rho}}$	$\frac{D}{t} \leq 150 \cdot \frac{235}{f_y}$ $\left(\frac{D}{t} \leq 150 \cdot \varepsilon^2\right)$	$\frac{D}{t} \leq 60 \cdot \sqrt{\frac{235}{f_y}}$ $\left(\frac{D}{t} \leq 60 \cdot \varepsilon\right)$
BS5400-5:2005 [18]	$235 \leq f_y \leq 355$ (MPa) $E_s = 205.000$ MPa	$f_{cu}^{100} \geq 20$ MPa $E_c = 450 \cdot f_{cu}$	$t \geq D \cdot \sqrt{\frac{f_y}{8 \cdot E_s}}$ $\left(\frac{D}{t} \leq 83.54 \cdot \varepsilon^2\right)$	$t \geq D \cdot \sqrt{\frac{f_y}{3 \cdot E_s}}$ $\left(\frac{D}{t} \leq 51.16 \cdot \varepsilon\right)$
CAN CSA :2009 [19]	$f_y \leq 350$ MPa	$20 \leq f_c \leq 80$	$\frac{D}{t} \leq \frac{28000}{f_y}$ $\left(\frac{D}{t} \leq 119.15 \cdot \varepsilon^2\right)$	$\frac{D}{t} \leq \frac{1350}{\sqrt{f_y}}$ $\left(\frac{D}{t} \leq 88.06 \cdot \varepsilon\right)$
AIJ 2001 [8]	$235 \leq f_y \leq 355$ (MPa) $E_s = 210.000$ MPa	$f_c \leq 60$ (MPa)	$\frac{D}{t} \leq 1.50 \cdot \frac{23500}{f_y}$ $\left(\frac{D}{t} \leq 150 \cdot \varepsilon^2\right)$	$\frac{D}{t} \leq 1.50 \cdot \frac{735}{\sqrt{f_y}}$ $\left(\frac{D}{t} \leq 72 \cdot \varepsilon\right)$
NBR 8800 [9]	$f_y \leq 450$ MPa $E_s = 200.000$ MPa	$20 \leq f_c \leq 50$ (MPa) $E_c = 40.5 \cdot \left(\frac{\rho_c}{100}\right)^{1.5} \cdot \sqrt{f_c}$	$\frac{D}{t} \leq 0.15 \cdot \frac{E_s}{f_y}$ $\left(\frac{D}{t} \leq 127.66 \cdot \varepsilon^2\right)$	$\frac{D}{t} \leq 2.26 \cdot \sqrt{\frac{E_s}{f_y}}$ $\left(\frac{D}{t} \leq 65.93 \cdot \varepsilon\right)$

Where  $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$  ( $f_y$  in MPa)

Tabla 16. Recapitulativo de las limitaciones de los códigos de diseño actuales



## 8.1. Eurocode 4 [4], EN1994-1-1:2004

Para el caso de los pilares que son objeto de este estudio, pilares mixtos CFT circulares, el eurocódigo propone un modelo donde la capacidad se obtiene como la suma de la capacidad seccional de cada material pero para una carga concéntrica y una esbeltez relativa inferior a 0.50, el modelo mejora la contribución del hormigón y reduce la del acero.

$$N_{EC4,CCFT} = \eta_a \cdot A_a \cdot f_y + \left( 1 + \eta_c \cdot \frac{t}{D} \cdot \frac{f_y}{f_c} \right) A_c \cdot f_c$$

Donde  $\eta$  es el coeficiente de confinamiento de cada uno de los materiales,  $\eta_a$  para el acero y  $\eta_c$  para el hormigón,  $N_{cr}$  es la carga axial crítica.

$$\eta_a = 0.25 \cdot (3 + 2 \cdot \bar{\lambda}) \leq 1.00$$

$$\eta_c = 4.9 - 18.5 \cdot \bar{\lambda} + 17 \cdot \bar{\lambda}^2 \geq 0.00$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pRk}}{N_{cr}}}$$

$$N_{pRk} = A_a \cdot f_y + A_c \cdot f_c$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot (EI)_{eff}}{L^2}$$

$$(EI)_{eff} = E_a \cdot I_a + 0.60 \cdot E_{cm} \cdot I_c$$

Como muestra la tabla 16, el eurocódigo está limitado a valores de  $f_y$  comprendidos entre 235 y 460 MPa, y valores de  $f_c$  comprendidos entre 25 y 50.

De nuestra base de ensayos, solo hay 202 ensayos de los 490 que cumplan estas condiciones.

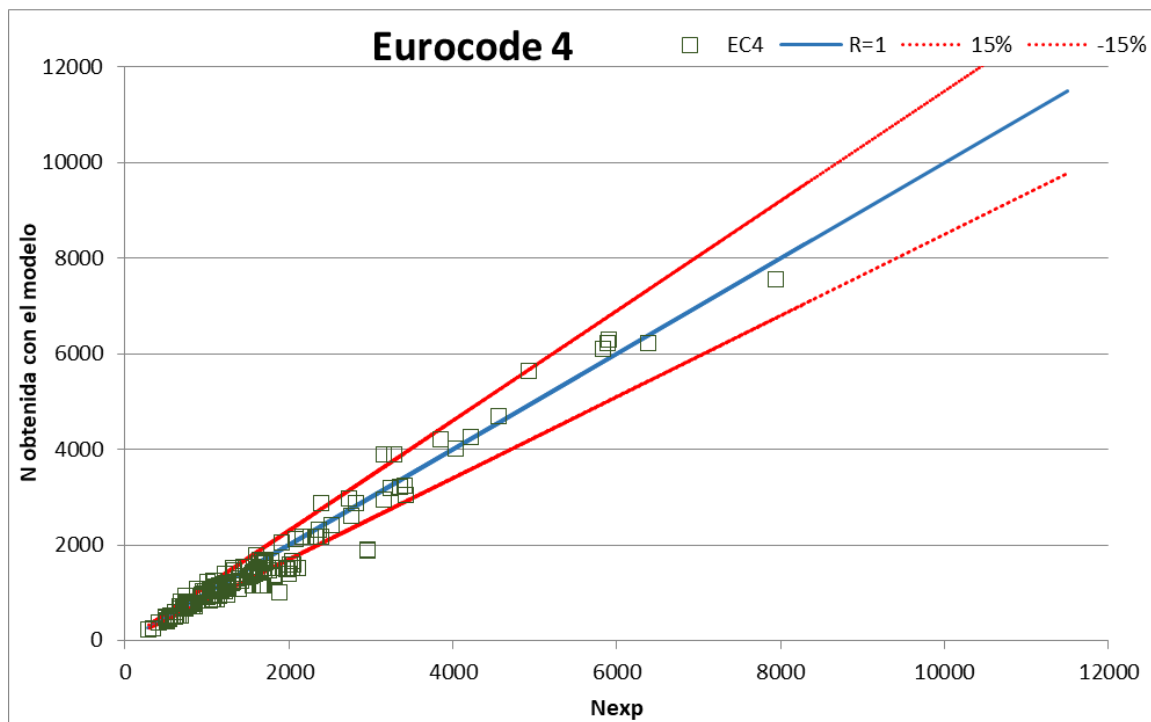


Ilustración 26. Resultados experimentales frente a los obtenidos con el Eurocode 4

Promedio	1.07
Max	1.83
Min	0.76
Desviación estándar	0.15

Tabla 17. Resultados de  $N_{exp}/N$  estimada por el Eurocode 4

Como se puede apreciar en la ilustración 26, se obtiene un resultado favorable al estar la mayoría de los valores dentro del intervalo de confianza del 15% del valor de  $N_{exp}$ . Aun así, que el promedio no sea especialmente bueno, sumado a las limitaciones del modelo respecto a  $f_c$  y  $f_y$  de los ensayos, limita mucho su uso y obliga a investigar más a fondo sobre el tema.

Si intentamos usar el modelo propuesto por el eurocódigo 4 sin las limitaciones en  $f_c$  y  $f_y$  obtenemos más resultados que sobresalen del intervalo de confianza fijado, tal como muestra la ilustración 27.

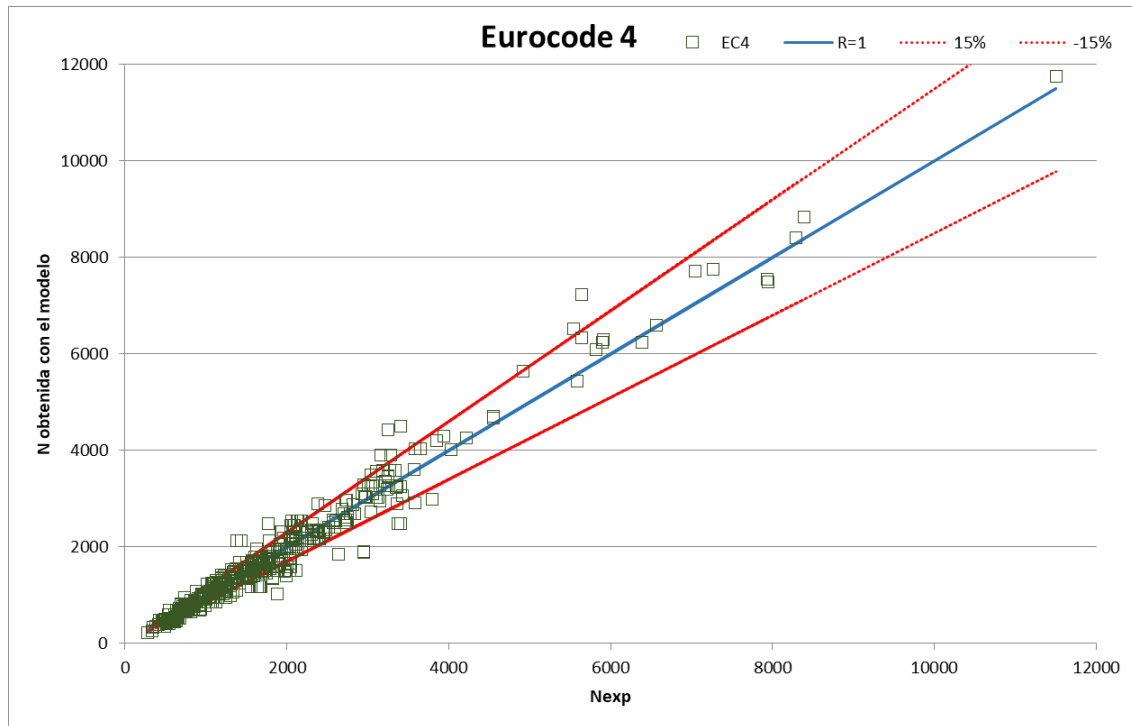


Ilustración 27. Resultados experimentales frente a los obtenidos con el Eurocode 4 eliminando las limitaciones

Promedio	1.03
Max	1.83
Min	0.64
Desviación estándar	0.14

Tabla 18. Resultados de  $N_{exp}/N$  estimada por el Eurocode 4 eliminando las limitaciones

## 8.2. AISC 360:2010 [7]

Este código técnico incluye acero y hormigón de alta resistencia. Además, tiene en cuenta el confinamiento del hormigón para el caso de perfiles circulares.

$$N_{AISC} = N_0 \cdot 0.658^{\frac{N_0}{N_e}}$$

$$N_0 = P_p = A_a \cdot f_y + \alpha \cdot A_c \cdot f_c \quad \text{si } \lambda \leq \lambda_p$$

$$N_0 = P_p - \frac{P_p - P_y}{(\lambda_r - \lambda_p)^2} \cdot (\lambda - \lambda_p)^2 \quad \text{si } \lambda_p < \lambda \leq \lambda_r$$

$$N_0 = A_a \cdot F_{cr} + 0.70 \cdot A_c \cdot f_c \quad \text{si } \lambda > \lambda_r$$

Donde  $\alpha=0.95$  para los perfiles circulares.

$$F_{cr,CCFT} = \left( \frac{0.72 \cdot f_y}{\left( \frac{D}{t} \cdot \frac{f_y}{E_s} \right)^{0.20}} \right)$$

$$\lambda_{CCFT} = \frac{D}{t}$$

$$\lambda_{p,CCFT} = 0.15 \cdot \frac{E_a}{f_y}$$

$$\lambda_{r,CCFT} = 0.19 \cdot \frac{E_a}{f_y} \quad \lambda_{\max,CCFT} = 0.31 \cdot \frac{E_a}{f_y}$$

$$N_e = \frac{\pi^2 \cdot EI}{L^2}$$

$$EI = E_a I_a + C_3 \cdot E_c I_c$$

$$C_3 = 0.60 + 2 \cdot \frac{A_a}{A_a + A_c} \leq 0.90$$

El código AISC está limitado a valores de  $f_y$  comprendidos inferiores a 525 MPa, y valores de  $f_c$  comprendidos entre 21 y 70. Estas condiciones más laxas permiten aumentar el número de ensayos a 321 de los 490 que figuran en la base de datos utilizada en este proyecto.

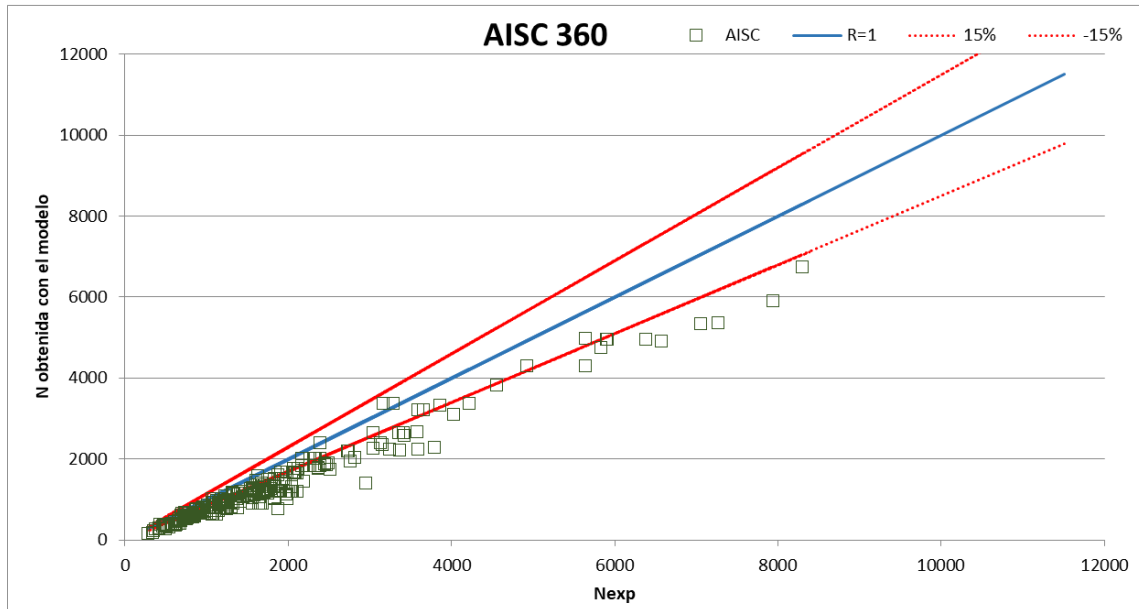


Ilustración 28. Resultados experimentales frente a los obtenidos con el AISC 360

Promedio	1.33
Max	2.34
Min	0.93
Desviación estándar	0.19

Tabla 19. Resultados de  $N_{exp}/N$  estimada por el AISC 360

Casi todos los valores estimados por este modelo están por debajo del valor experimental, tratándose de un código demasiado conservador.

Al igual que con el eurocódigo, al eliminar las limitaciones de  $f_c$  y  $f_y$ , el modelo empeora su fiabilidad. Aunque en este caso este efecto es más reducido al ya incluir acero y hormigón de alta resistencia.

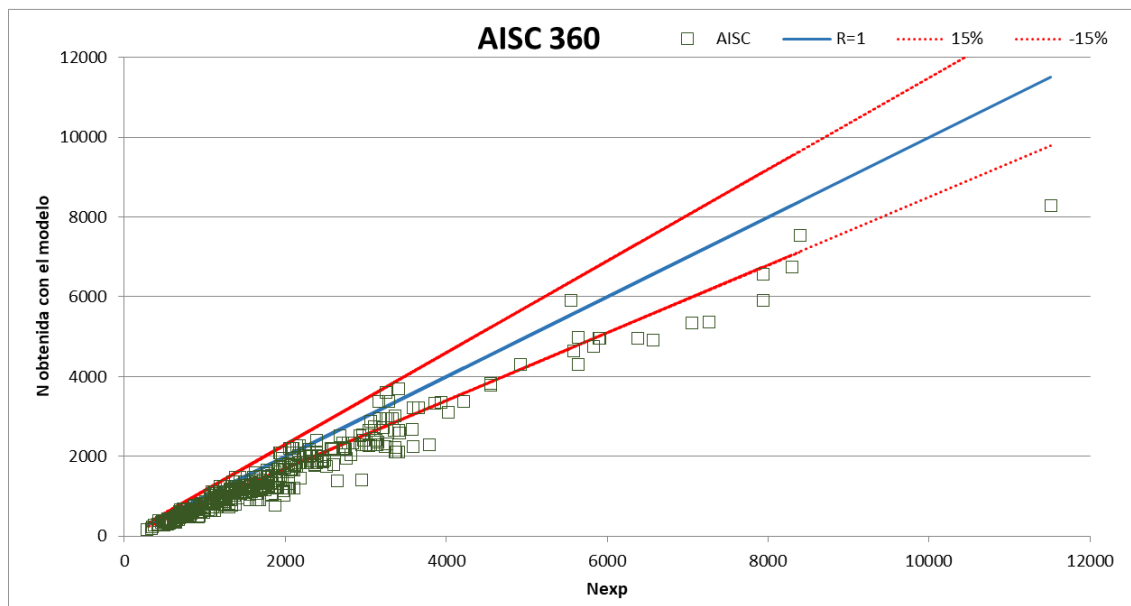


Ilustración 29. Resultados experimentales frente a los obtenidos con el AISC 360 eliminando las limitaciones

Promedio	1.30
Max	2.34
Min	0.90
Desviación estándar	0.20

Tabla 20. Resultados de  $N_{exp}/N$  estimada por el AISC 360 eliminando las limitaciones

### 8.3. DBJ13-51:2010 [17]

Este es el estándar para la construcción en China. En él se supone que el pilar es de un solo material con el área total

$$N_{pl} = A_{sc} \cdot f_{sc}$$

$$A_{sc} = (A_a + A_c)$$

$$f_{sc,CCFT} = (1.14 + 1.02 \cdot \xi_0) \cdot f_c$$

Donde,

$$\xi_0 = \frac{A_a \cdot f_y}{A_c \cdot f_c}$$

El código DBJ13 está limitado a valores de  $f_y$  comprendidos entre 235 y 420 MPa, y valores de  $f_c$  comprendidos entre 30 y 90 MPa. Estas condiciones hacen que el número de ensayos se limite a 218 de los 490 que figuran en la base de datos utilizada en este proyecto.

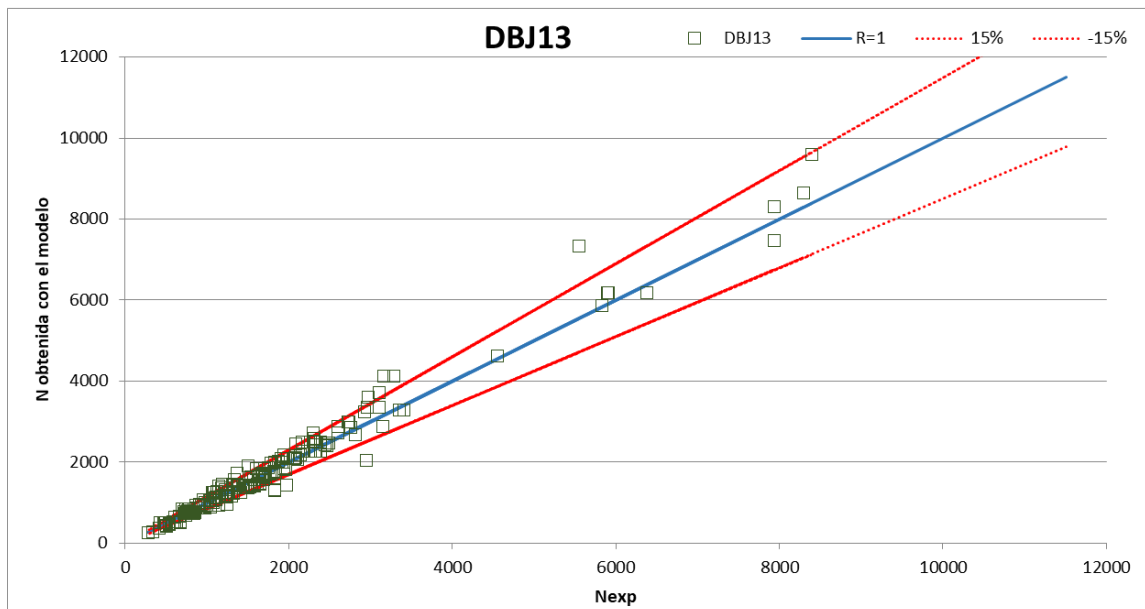


Ilustración 30. Resultados experimentales frente a los obtenidos con el DBJ13

Promedio	0.99
Max	1.44
Min	0.76
Desviación estándar	0.12

Tabla 21. Resultados de  $N_{exp}/N$  estimada por el DBJ13

Los valores obtenidos por el modelo del DBJ13 se acercan mucho a los experimentales, aunque varios valores están por encima del intervalo de confianza al 15%, tal como se puede apreciar en la ilustración 30.

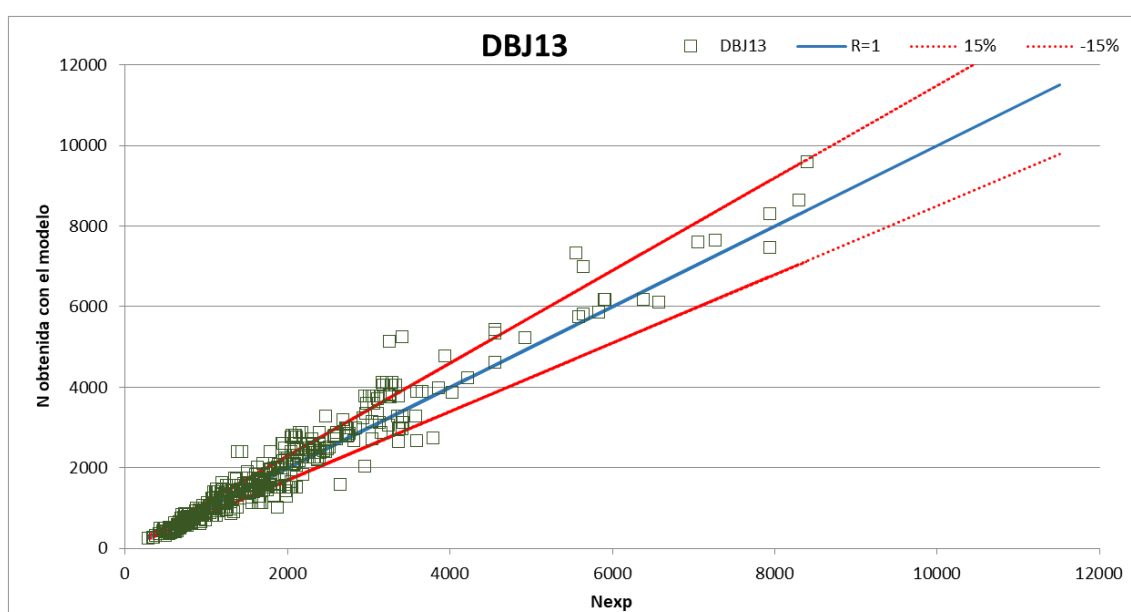


Ilustración 31. Resultados experimentales frente a los obtenidos con el DBJ13 eliminando las limitaciones

Promedio	1.03
Max	1.82
Min	0.57
Desviación estándar	0.17

Tabla 22. Resultados de  $N_{exp}/N$  estimada por el DBJ13 eliminando las limitaciones

Si eliminamos las limitaciones e incluimos toda la base de datos la eficiencia del modelo empeora considerablemente, tal como muestra la ilustración 31.



## 8.4. CAN CSA 16:2009 [19]

Para el código canadiense:

$$N_{CAN\_CSA} = \left( \tau \cdot A_a \cdot f_y + \tau' \cdot A_c \cdot \alpha_1 \cdot f_c \right) \cdot \left( 1 + \lambda^{2n} \right)^{-\frac{1}{n}}$$

Donde,

$$\lambda = \sqrt{\frac{C_p}{C_{ec}}}$$

$$C_p = A_a \cdot f_y + A_c \cdot f_c$$

$$C_{ec} = \frac{\pi^2 \cdot EI_e}{L^2}$$

$$EI_e = E_a I_a + 0.60 \cdot E_c I_c$$

$$CCFT \begin{cases} \tau = \frac{1}{\sqrt{1 + \rho + \rho^2}} \\ \tau' = 1 + \left( \frac{25 \cdot \rho^2 \cdot \tau}{\frac{D}{t}} \right) \cdot \left( \frac{f_y}{\alpha_1 \cdot f_c} \right) \\ \rho = 0.02 \cdot \left( 25 - \frac{L}{D} \right) \\ \alpha_1 = 0.85 - 0.0015 \cdot f_c \geq 0.67 \end{cases}$$

$$n=1.80$$

El código CAN CSA 16 está limitado a valores de  $f_y$  inferiores 350 MPa, y valores de  $f_c$  comprendidos entre 20 y 80 MPa. Estas condiciones hace que el número de ensayos se limite a 199 de los 490 que figuran en la base de datos utilizada en este proyecto.

Las ilustraciones 33 y 33 muestran los resultados obtenidos con el modelo del código CAN CSA.

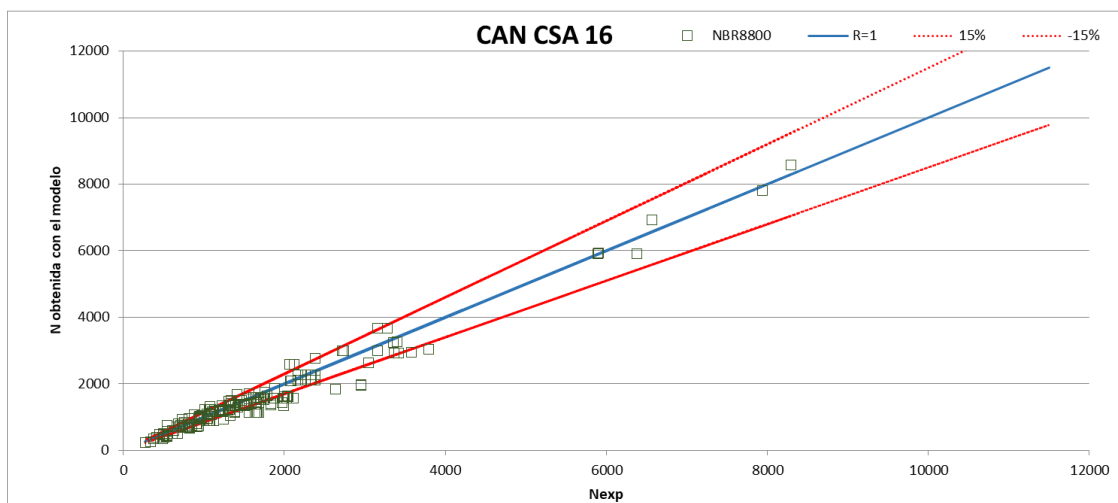


Ilustración 32. Resultados experimentales frente a los obtenidos con el CAN CSA 16

Promedio	1.07
Max	1.50
Min	0.71
Desviación cuadrada	0.15

Tabla 23. Resultados de  $N_{exp}/N$  estimada por el CAN CSA 16

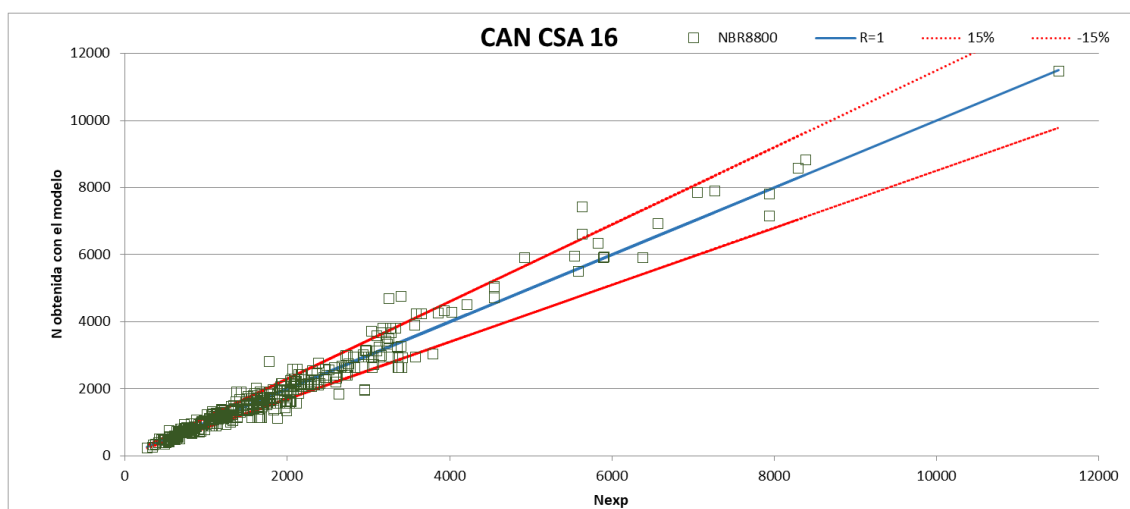


Ilustración 33. Resultados experimentales frente a los obtenidos con el CAN CSA 16 eliminando las limitaciones

Promedio	1.02
Max	1.66
Min	0.62
Desviación estándar	0.13

Tabla 24. Resultados de  $N_{exp}/N$  estimada por el CAN CSA 16 eliminando las limitaciones

## 8.5. NBR8800:2008 [9]

Para el código técnico brasileño el modelo es simple y es el siguiente:

$$N_{NBR} \leq \chi \cdot N_0$$

$$N_{0\_CCFT} = A_a \cdot f_y + 0.95 \cdot A_c \cdot f_c$$

$$\chi = 0.658^{\frac{N_0}{N_e}}$$

$$N_e = \frac{\pi^2 \cdot EI}{L^2}$$

$$EI = E_a I_a + 0.60 \cdot E_c I_c$$

El código NBR 8800 está limitado a valores de  $F_c$  inferiores 450 MPa, y valores de  $F_c$  comprendidos entre 20 y 50 MPa. Estas condiciones hacen que el número de ensayos se limite a 243 de los 490 que figuran en la base de datos utilizada en este proyecto.

Las ilustraciones 34 y 35 muestran los resultados obtenidos con este modelo.

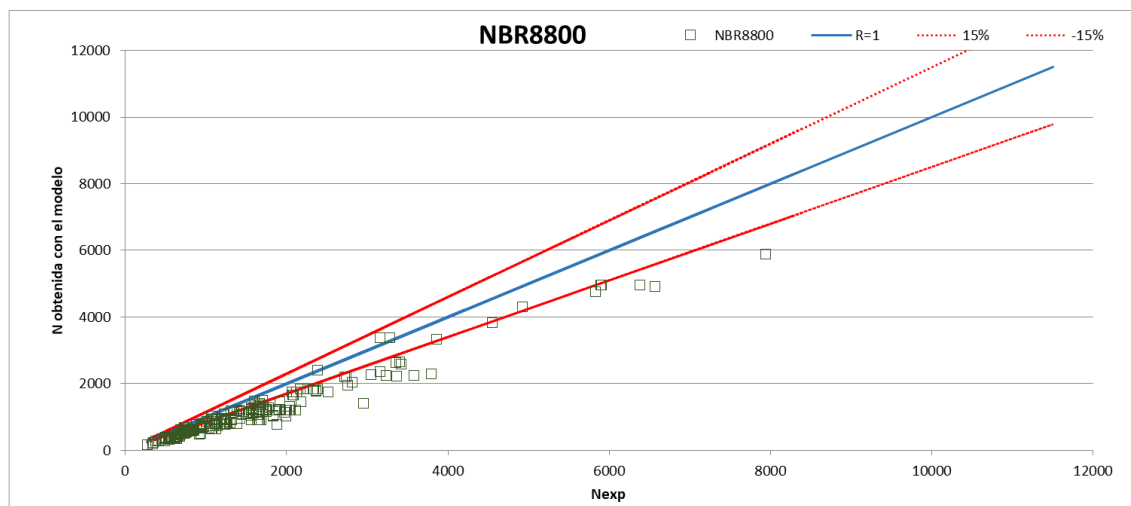


Ilustración 34. Resultados experimentales frente a los obtenidos con el NBR 8800

Promedio	1.38
Max	2.34
Min	0.93

Desviación estándar	0.20
---------------------	------

Tabla 25.. Resultados de  $N_{exp}/N$  estimada por el NBR 8800

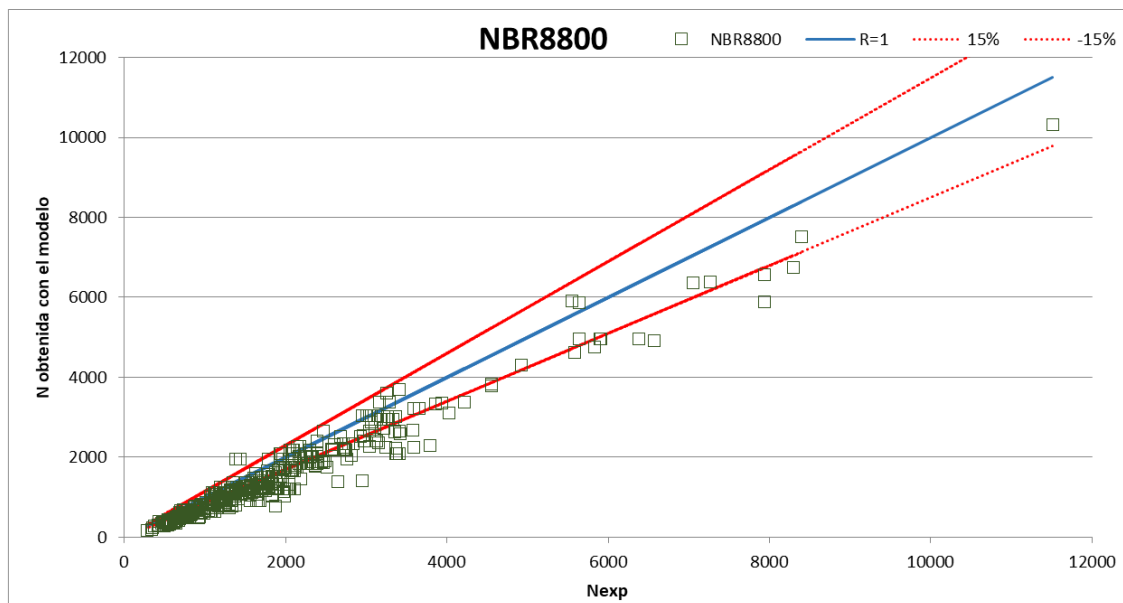


Ilustración 35. Resultados experimentales frente a los obtenidos con el NBR 8800 eliminando las limitaciones

Promedio	1.29
Max	2.34
Min	0.70
Desviación estándar	0.21

Tabla 26.Resultados de  $N_{exp}/N$  estimada por el NBR 8800 eliminando las limitaciones

## 8.6. BS5400:2005 [18]

El código británico presenta un modelo en función de la geometría de la sección. Para el caso de pilares mixtos circulares CCFT, el modelo considera el confinamiento, y los ratios geométricos  $L/D$  y  $D/t$ .

$$N_{BS5400,CCFT} = 0.95 \cdot A_a \cdot f'_y + 0.45 \cdot A_c \cdot f_{cc}$$

$$f_{cc} = f_{cu} + C_1 \cdot \frac{t}{D} \cdot f_y$$

$$f'_y = C_2 \cdot f_y$$

$\frac{L}{D}$	C1	C2
0	9.47	0.76
5	6.40	0.80
10	3.81	0.85
15	1.80	0.90
20	0.48	0.95
25	0	1.00

El código BS5400 está limitado a valores de  $f_y$  comprendidos entre 235 y 355 MPa, y valores de  $f_c$  superiores a 20 MPa. Estas condiciones hacen que el número de ensayos se limite a 250 de los 490 que figuran en la base de datos utilizada en este proyecto.

Las ilustraciones 36 y 37 muestran los resultados obtenidos con este modelo.

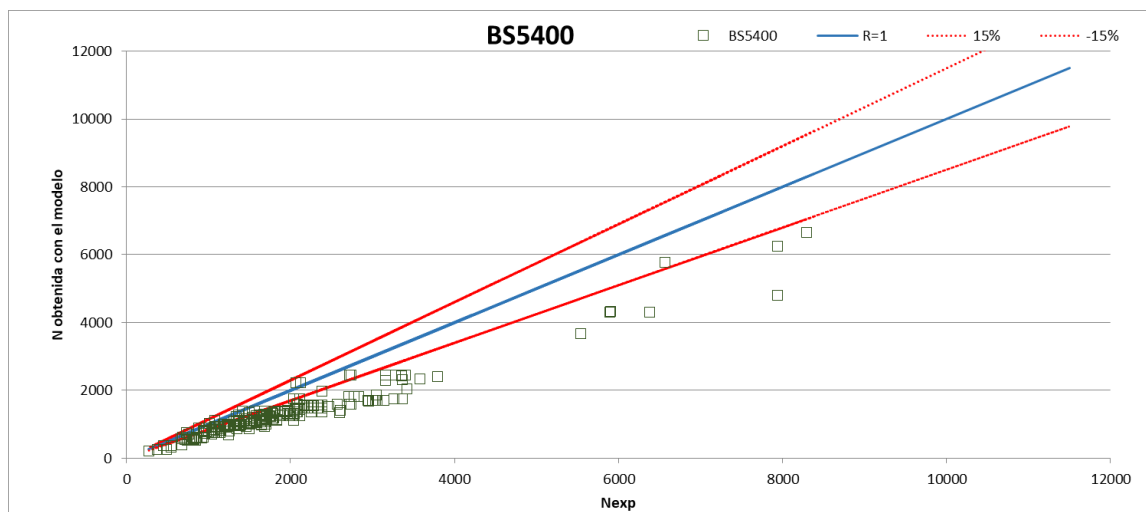


Ilustración 36. Resultados experimentales frente a los obtenidos con el BS5400

Promedio	1.41
Max	1.90
Min	0.92
Desviación estándar	0.20

Tabla 27.Resultados de  $N_{exp}/N$  estimada por el BS5400

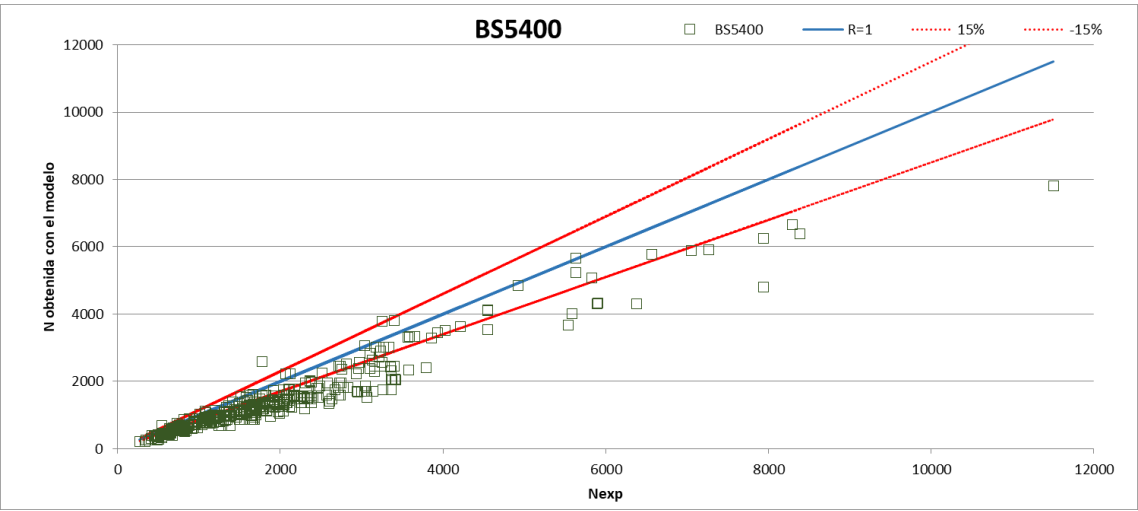


Ilustración 37. Resultados experimentales frente a los obtenidos con el BS5400 eliminando las limitaciones

Promedio	1.35
Max	1.99
Min	0.68
Desviación estándar	0.22

Tabla 28.Resultados de  $N_{exp}/N$  estimada por el BS5400 eliminando las limitaciones

## 9. Modelo obtenido

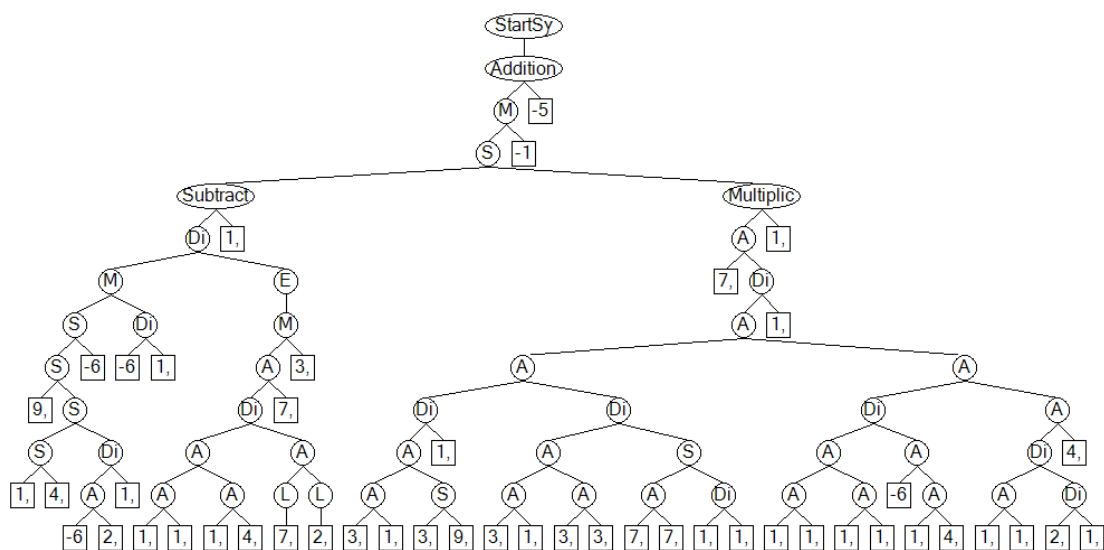
Como se ha comentado anteriormente se han realizado varios test para ver en qué software se obtenían mejores resultados y bajo qué condiciones. Según los resultados obtenidos se ha optado por utilizar el software HeuristicLab y repetir los test 2.12 y 3.9 pero con un número mayor de generaciones y una población inicial superior. Además, se realizará 10 veces cada uno.

Exactamente se aumentarán el número de generaciones a 100 y la población inicial a 2000 individuos. Por tanto, nosotros modelo tendrá dos fórmulas para el cálculo de la capacidad seccional de los pilares CCFT. Una para cuando  $f_c \leq 50$  MPa ( $N_{fc \leq 50 \text{ MPa}}$ ) y otra para cuando  $f_c > 50$  MPa ( $N_{fc > 50 \text{ MPa}}$ ).

Para  $N_{fc \leq 50 \text{ MPa}}$  se obtiene el siguiente modelo, cuyo árbol muestra la ilustración 38:

Archivo	2		Crossover	Selección	Mutación		Resultado					
Nº de archivo	Nº gen.	Tamaño población	Tipo	Tipo	Tipo	Prob.	Error relativo medio (test)	Error relativo medio (entr)	Model Depth	Model Length	R <sup>2</sup> de Pearson (test)	R <sup>2</sup> de Pearson (entr)
Final	100	2000	Deterministic	Tournament Selector	Full tree shaker	0.15	11.32%	8.91%	14	100	0.948	0.978

Tabla 29. Condiciones utilizadas para obtener el modelo de CCFT  $f_c \leq 50$  MPa



$$N_{fc \leq 50MPa} = \frac{(((0.911353113359202 * \$C1 - ((1.73100964715377 * \$B1 - 0.473094537767325 * \$C1) - (0.656630972955595 * \$G1 + 2.42643511026164 * \$C1) / (1.2910899904382 * \$B1))) - 0.656630972955595 * \$G1) * 0.611007488590965 * \$F1 / (17.0516661561508) / (\exp(((1.73100964715377 * \$B1 + 1.56417771876013 * \$D1) + (1.73100964715377 * \$B1 + 0.473094537767325 * \$C1)) / (\ln(0.793356317121828 * \$D1) + \ln(0.205287509747578 * \$C1))) + 0.793356317121828 * \$D1) * 3.59680219484191 * \$F1) - 1.50425135948385 * \$E1) - (0.793356317121828 * \$D1 + (((0.390088424996105 * \$A1 + 1.39146041032897 * \$G1) + (0.390088424996105 * \$A1 - 0.911353113359202 * \$C1)) / (17.0516661561508) + ((0.390088424996105 * \$A1 + 1.39146041032897 * \$G1) + (0.390088424996105 * \$A1 + 0.390088424996105 * \$A1)) / (((0.793356317121828 * \$D1 + 0.793356317121828 * \$D1) - 1.39146041032897 * \$G1 / (1.2910899904382 * \$B1)))) + (((1.73100964715377 * \$B1 + 1.39146041032897 * \$G1) + (1.39146041032897 * \$G1 + 1.39146041032897 * \$G1)) / ((-0.656630972955595 * \$G1 + (1.73100964715377 * \$B1 + 0.473094537767325 * \$C1))) + ((1.39146041032897 * \$G1 + 1.39146041032897 * \$G1) / (2.42643511026164 * \$C1 / (1.73100964715377 * \$B1)) + 0.473094537767325 * \$C1))) / (16.108752850502)) * 1.10320017568401 * \$F1) * -11751.4891296111 + -52.4100222729867)$$

Donde,

$$D = A \quad A_c = E$$

$$t = B \quad A_s = F$$

$$f_y = C \quad L = G$$

$$f_c = D$$

Si reducimos la fórmula para que sea algo más inteligible para lector:

$$N_{fc \leq 50MPa} = \left( \left( 0.91f_y - 1.73t - 0.47f_y + \frac{0.66L - 2.43f_y}{1.29t} + 0.66L \right) * \right. \\ \left. - \frac{0.62A_s}{17.05 * e^{\left( \frac{1.73t + 1.56f_c + 1.73t + 0.47f_y}{\ln(0.79f_c) + \ln(0.21f_y)} + 0.79f_c \right) * 3.60A_s}} - 1.50A_c \right) - (0.79f_c + \\ \frac{1.39L + 0.80D - 0.91f_y}{17.05} + \frac{1.20D + 1.39L}{1.6f_c - \frac{1.39L}{1.29t}} + \frac{1.73t + 4.19L}{-0.66L + 1.73t + 0.47f_y} + \frac{2.8L}{\frac{2.43f_y}{1.73t}} + 0.47f_y) * 1.10A_s) * -11751.49 - 52.41$$



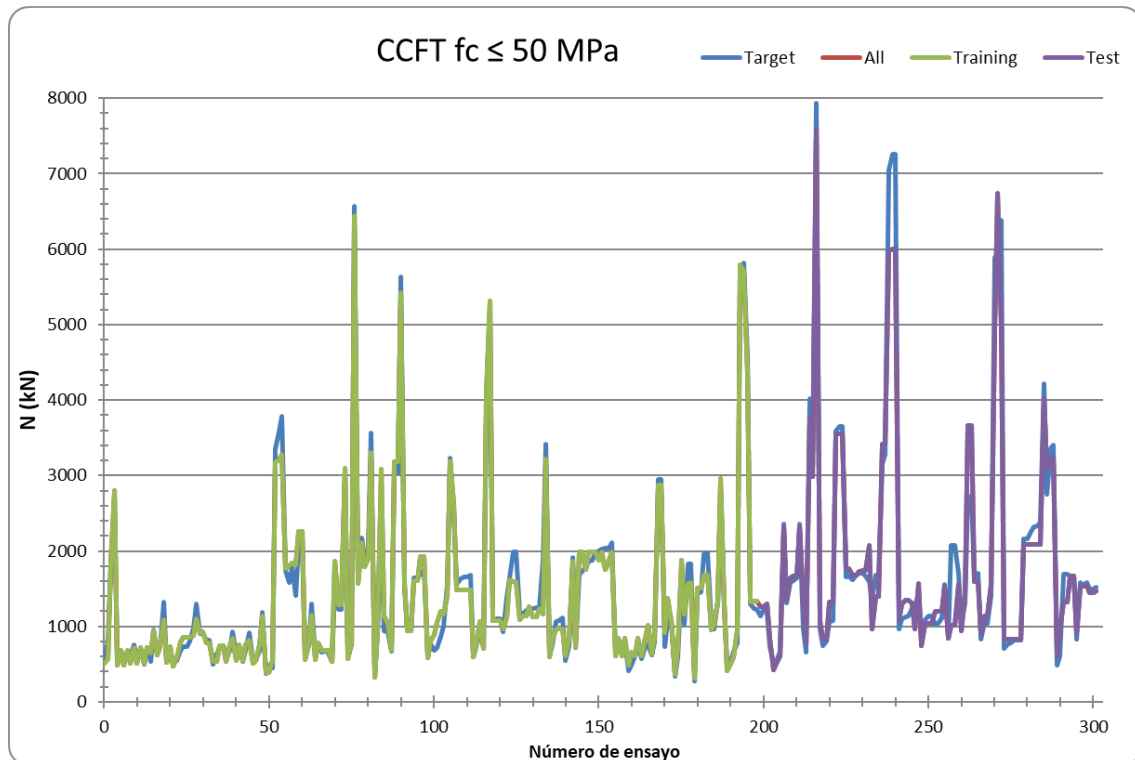


Ilustración 39. Gráfica de los resultados obtenidos con el modelo para CCFT  $f_c \leq 50$  MPa para cada ensayo y su valor experimental

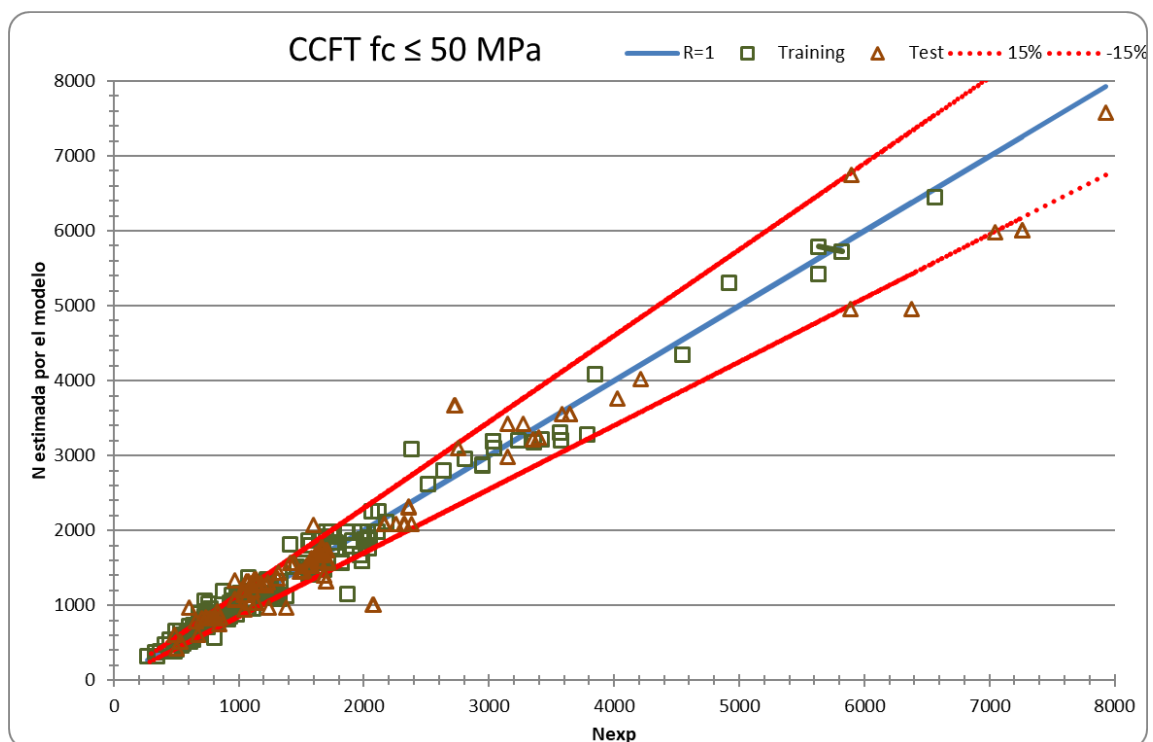


Ilustración 40. Gráfica de los resultados obtenidos con el modelo para CCFT  $f_c \leq 50$  MPa frente al valor experimental

Promedio	1.01
Max	2.05
Min	0.63
Desviación estándar	0.15

Tabla 30. Resultados de  $N_{exp}/N$  estimada para  $CCFT_{fc} \leq 50 \text{ MPa}$

Los resultados obtenidos en este caso, ilustración 39 y 40 y tabla 30, son peores que los del test 2.12. Por tanto, se considera mejor mantener el modelo obtenido en el test 2.12 con HeuristicLabs durante los test iniciales.

Para  $N_{fc > 50 \text{ MPa}}$  se obtiene el siguiente modelo, cuyo árbol muestra la ilustración 41:

Archivo	3		Crossover	Selección	Mutación		Resultado					
Nº de archivo	Nº gen.	Tamaño población	Tipo	Tipo	Tipo	Prob.	Error relativo medio (test)	Error relativo medio (entr)	Model Depth	Model Length	R <sup>2</sup> de Pearson (test)	R <sup>2</sup> de Pearson (entr)
Final	100	2000	Deterministic	Best selector	One point shaker	0,049	9,35%	7,61%	14	107	0,829	0,992

Tabla 31. Condiciones utilizadas para obtener el modelo de  $CCFT_{fc} > 50 \text{ MPa}$

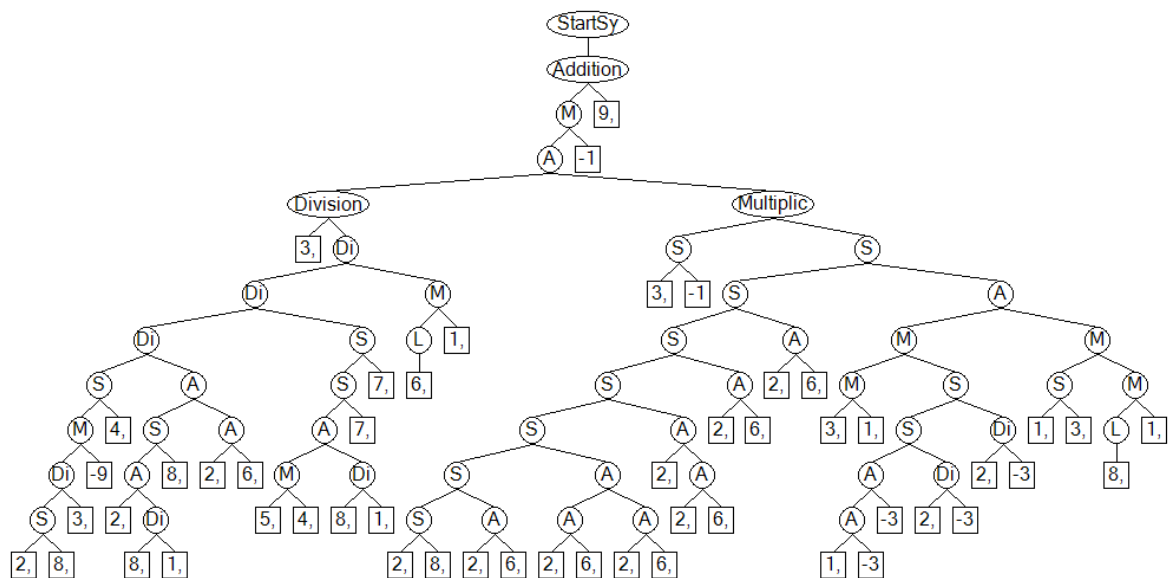


Ilustración 41 Árbol del modelo obtenido para  $fc > 50 \text{ MPa}$

$$N_{fc>50MPa} = ((3.8055066145761/(((2.00715167707583* \$C1 - 0.840804476048636* \$F1)/(3.8055066145761)* - 9.74324675134591 - 0.463127072655004* \$F1)/((((2.00715167707583* \$C1 + 0.846172393092083* \$C1/(12.6230664084365)) - 0.840804476048636* \$F1) + (2.40846640581423* \$F1 + 0.607365641054801* \$F1)))/((((0.0587332183741616* \$E1 * 4.69872192747015 + 0.846172393092083* \$C1/(12.6230664084365)) - 0.00710049664779151* \$D1) - 0.00710049664779151* \$D1)/(LN(0.635774950816396* \$C1 * 1.08799794290598* \$C1)) + (0.382179035494239* \$D1 - 19.1228678654896) * (((((2.00715167707583* \$C1 - 0.840804476048636* \$F1) - (2.40846640581423* \$F1 + 0.607365641054801* \$F1)) - ((2.40846640581423* \$F1 + 0.607365641054801* \$F1) + (2.40846640581423* \$F1 + 0.607365641054801* \$F1))) - (2.40846640581423* \$F1 + (2.40846640581423* \$F1 + 0.607365641054801* \$F1))) - (2.40846640581423* \$F1 + 0.607365641054801* \$F1)) - (2.40846640581423* \$F1 + 0.607365641054801* \$F1)) - (0.323954849240463* \$B1 * 1.89164199982403* \$A1 * (((1.08799794290598* \$C1 + -0.397171487547222* \$D1) + -0.397171487547222* \$D1) - 2.00715167707583* \$C1 / (-0.397171487547222* \$D1)) - 2.00715167707583* \$C1 / (-0.397171487547222* \$D1)) + (1.7906586005264* \$A1 - 0.382179035494239* \$D1) * LN(0.846172393092083* \$C1 * 1.18755464317293* \$A1))) * - 0.000100301075584074 + 95.9643095102374)$$

Donde,

$$D = A \quad f_c = D$$

$$t = B \quad A_s = E$$

$$f_y = C \quad L = F$$

Si reducimos la fórmula para que sea algo más inteligible para lector:

$$N_{fc>50MPa} = \left( \frac{3.81 * (2.08 f_y + 2.18 L) * (0.28 A_s + 0.067 f_y - 0.02 f_c) * (Ln(0.64 f_y) * 1.09 f_y)}{\frac{(2.01 f_y - 0.84 L) * 9.74}{3.81} - 0.46 L} \right) + (0.39 f_c + 19.12) * ((2.01 f_y - 21.37 L) - (0.61 t * D * ((1.09 f_y - 0.8 f_c + \frac{5.025 f_y}{f_c}) + \frac{5.025 f_y}{f_c} + (1.79 D - 0.38 f_c) * Ln(0.85 f_y) * 1.19 D))) * (-0.0001) + 95.96$$

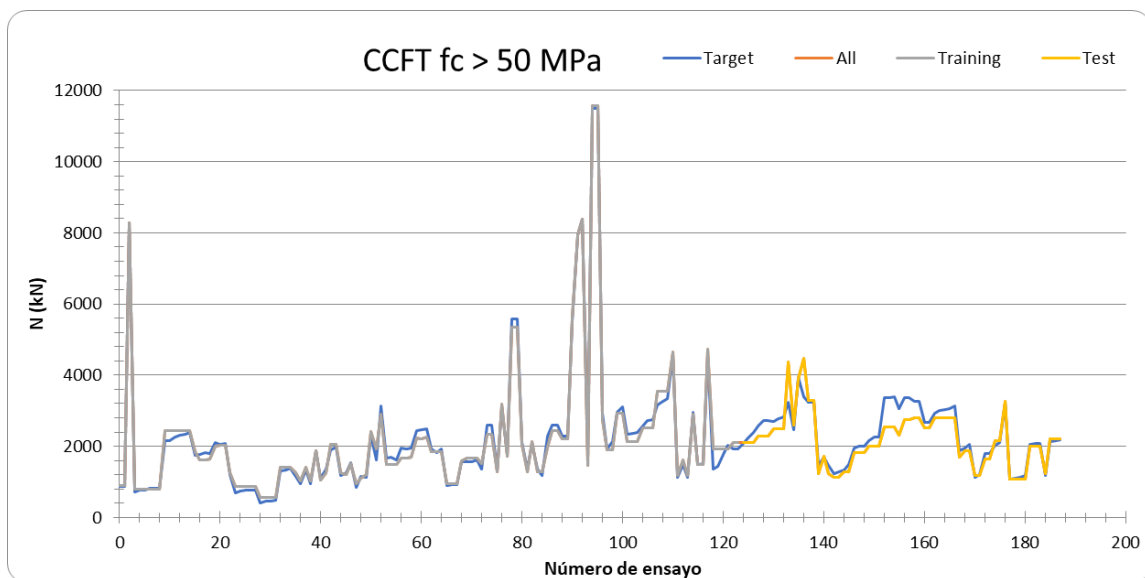


Ilustración 42. Gráfica de los resultados obtenidos con el modelo para CCFT  $f_c > 50$  MPa para cada ensayo y su valor experimental

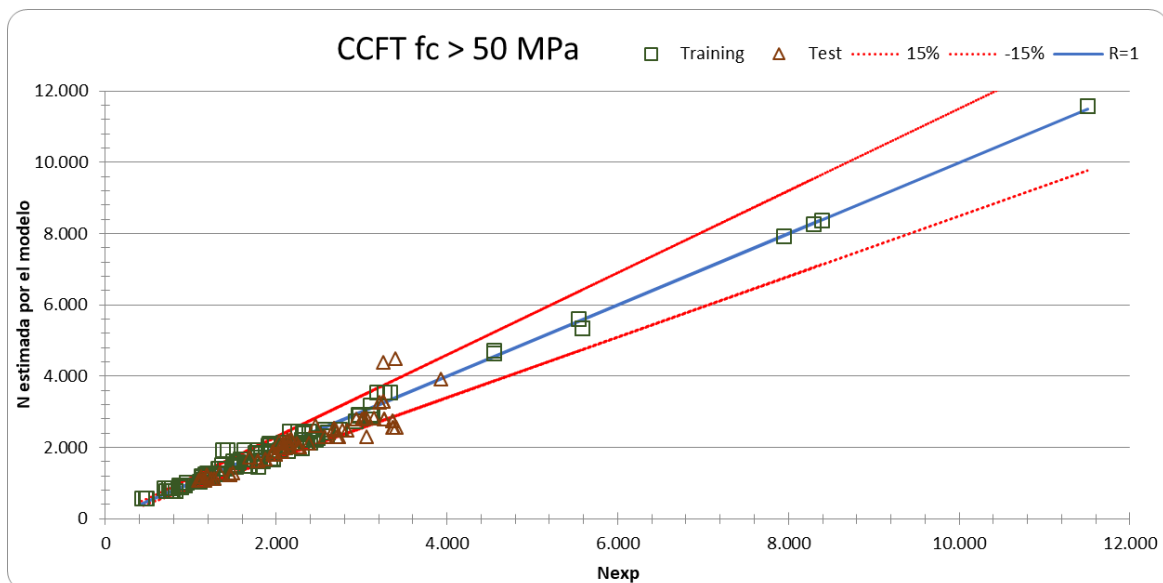


Ilustración 43. Gráfica de los resultados obtenidos con el modelo para CCFT  $f_c > 50$  MPa frente al valor experimental

Promedio	1,02
Max	1,33
Min	0,71
Desviación estándar	0.11

Tabla 32. Resultados de  $N_{exp}/N_{estimada}$  para CCFT  $f_c > 50$  MPa

## 10. Conclusiones

Tras el trabajo realizado en este proyecto, los algoritmos genéticos o evolutivos parecen ser una opción válida para el cálculo de pilares mixtos CCFT. El modelo obtenido en este proyecto mediante un algoritmo genético predice mejor la capacidad seccional que la mayoría de códigos de diseño estudiados en este proyecto. Además de presentar menos limitaciones, la predicción para los ensayos donde  $f_c > 50$  MPa es muy precisa, tal como muestra la ilustración 42 y 43 y la tabla 32, y cubre una franja de ensayos que casi ningún código cubría.

A pesar de los buenos resultados obtenidos, estos modelos presentan varias desventajas respecto a los códigos de diseño estudiados. La primera es la complejidad de las fórmulas, siendo las del modelo mediante algoritmo evolutivo mucho más complejas. Además, cabe ser cauto con los resultados ya que para evaluar los códigos de diseño se ha utilizado la misma base de ensayos que la utilizada para crear el nuevo modelo. Por tanto, es normal que el modelo hallado mediante algoritmo evolutivo se adapte bien a la base de ensayos utilizada para su concepción.

Pese al importante número de test realizados, un problema de tal complejidad requiere de un mayor número de test y más variabilidad sobre las variables iniciales y las constantes a implementar. Por tanto, no hay duda de que el modelo obtenido en este trabajo puede ser ampliamente mejorado si se continuasen los test y los ajustes.

Este proyecto deja la puerta abierta a futuras investigaciones sobre el tema donde se profundice más en los parámetros, tras demostrarse que los algoritmos evolutivos pueden ser una opción válida para la resolución de este tipo de problemas.



## 11. Referencias

- [1] D. Hernández-Figueirido, A. Piquer, O. Martínez Ramos. Evaluation of Current Standard Codes for Sectional Capacity of Concrete-Filled Steel Columns: A New Proposal Model Using Artificial Neuronal Networks. The 8th International Conference on Steel and Aluminium Structures, 7 – 9 December, Hong Kong, China, 2016. ISBN: 978-962-8014-26-2
- [2] Haladuick, S.; Dann, M.R. Genetic Algorithm for Inspection and Maintenance Planning of Deteriorating Structural Systems: Application to Pressure Vessels. Infrastructures 2018, 3, 32.
- [3] Al-Douri, Yamur & AL-Chalabi, Hussan & Lundberg, Jan. (2018). Time Series Forecasting using Genetic Algorithm A case study of maintenance cost data for tunnel fans.
- [4] CEN. 2004. EN 1994-1-1, Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels, Belgium: Comité Européen de Normalisation.
- [5] Cifuentes Bulté, Héctor. “Análisis del comportamiento al fuego de Estructuras mixtas”. Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. Septiembre 2001.
- [6] Kalyanmar Deb & Samir Agrawal. Understanding Interactions Among Genetic Algorithm Parameters. Kanpur Genetic Algorithms Laboratory (KanGAL).
- [7] AISC. 2010. 360-10: Specification for Structural Steel Buildings, Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction.
- [8] AIJ, 2001. Recommendations for design and construction of concrete filled steel tubular structures. Architectural Institute of Japan, 2001.
- [9] NBR 8800:2008, Projeto e execução de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edificios. Comitê Brasileiro de Construção Civil. Bazant Z.P. and Cedolin L., Stability of Structures - Elastic, Inelastic, Fracture and Damage Theories, Oxford University Press, New York, 1991.
- [10] J. H. Holland. Adaptation in Natural and Artificial Systems. The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975.

- [11] Mitchell, Melanie. An Introduction to Genetic Algorithms. MIT Press, 1996.
- [12] Thengade, Anita & Dondal, Rucha. (2012). Genetic Algorithm – Survey Paper. IJCA Proc National Conference on Recent Trends in Computing, NCRTC. 5.
- [13] Andre, David and Astro Teller. "Evolving team Darwin United." In RoboCup-98: Robot Soccer World Cup II, Minoru Asada and Hiroaki Kitano (eds). Lecture Notes in Computer Science, vol.1604, p.346-352. SpringerVerlag, 1999.
- [14] Lingaraj, Haldurai. (2016). A Study on Genetic Algorithm and its Applications. International Journal of Computer Sciences and Engineering. 4. 139-143.
- [15] Noraini Mohd Razali, John Geraghty "A genetic algorithm performance with different selection strategies", Proceedings of the World Congress on Engineering Vol II, 2011.
- [16] AS5100: Bridge design-steel and composite construction. Australian Standard, 2004.
- [17] DBJ13-51-2010, Technical specification for concrete-filled steel tubular structures. Fuzhou: The construction department of Fujian, 2010.
- [18] BS 5400-2005: Steel, concrete and composite bridges. Code of Practice for Design of Composite Bridges. British Standards Institution, 2005.
- [19] S16-09 - Design of Steel Structures. Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, 2009.
- [20] Giakoumelis G, Lam D. 2004. Axial capacity of circular concrete-filled tube columns. Journal of Constructional Steel Research 60(7): 1049-1068.
- [21] Oliveira WLA, De Nardin S , El Debs ALHC, El Debs MK. 2009. Influence of concrete strength and length/diameter on the axial capacity of CFT columns. Journal of Constructional Steel Research 65 (12): 2103-2110.
- [22] Friedrich, Tobias & Wagner, Markus. (2014). Seeding the Initial Population of Multi-Objective Evolutionary Algorithms: A Computational Study. Applied Soft Computing. 33. 10.1016/j.asoc.2015.04.043.
- [23] GitHub. (2019). DEAP/deap. [en linea] Disponible en: <https://github.com/DEAP/deap>



[24]GitHub. (2019). LLNL/SoRa. [en línea] Disponible en:  
<https://github.com/LLNL/SoRa>

[25] François-Michel De Rainville, Félix-Antoine Fortin, Marc-André Gardner, Marc Parizeau and Christian Gagné, "DEAP: A Python Framework for Evolutionary Algorithms", in !EvoSoft Workshop, Companion proc. of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2012), July 07-11 2012

[26] GitHub. (2019). kstaats/karoo\_tools. [en línea] Disponible en:  
[https://github.com/kstaats/karoo\\_tools](https://github.com/kstaats/karoo_tools)

[27]Schmidt, M., Lipson, H. Distilling Free-Form Natural Laws from Experimental Data. Science 324, 5923 (2009), 81-85.

[28] Gardner, M. A., Gagn\E9, C., & Parizeau, M. (2015). Controlling code growth by dynamically shaping the genotype size distribution. Genetic Programming and Evolvable Machines, 16(4), 455-498

[29] Dev.heuristiclab.com. (2019). HeuristicLab. [en línea] Disponible en:  
<https://dev.heuristiclab.com/>



# PRESUPUESTO



El presupuesto requerido para este proyecto se puede dividir en tres partes:

- Mano de obra
- Materiales
- Licencias

## Mano de obra

La mano de obra incluye todo lo necesario para la elaboración de este proyecto, desde la investigación pasando por la elaboración del modelo hasta la elaboración de este informe.

Concepto	Unidades	Coste unitario	Coste total
Ingeniero junior	300 horas	17,00 €/hora	5.100,00 €
<b>Subtotal</b>			<b>5.100,00 €</b>

## Materiales

Para el desarrollo de este proyecto se ha requerido de un ordenador. Este ordenador no se ha comprado exclusivamente para el proyecto y tras este proyecto continuará su vida útil. Por tanto, se considerará únicamente una amortización del 10% del valor de dicho bien.

También se considera la electricidad consumida por el ordenador. Se estima un consumo de 0.11kWh por una utilización de 300 horas.

Concepto	Unidades	Coste unitario	Coste total
Ordenador portátil Lenovo	0.1	499,99 €	49,99 €
Electricidad consumida	33 kW	0.12 €/kWh	3.96 €
<b>Subtotal</b>			<b>53.95 €</b>

## Licencias

A continuación se lista el coste de las licencias requeridas para la realización de este proyecto. Al igual que en el apartado de materiales, el software MS Office personal ya se poseía en el dispositivo y se va a seguir utilizando tras el presente proyecto. Por tanto, se considera una amortización del 10% .

Concepto	Unidades	Coste unitario	Coste total
MS Office personal	0.1	69,00 €	6,99 €
Subtotal			6,99 €

## Presupuesto total

Concepto	Coste total
Mano de obra	5.100,00 €
Materiales	53,95 €
Licencias	6,90 €
<b>Total</b>	<b>5.160,85 €</b>

# PLIEGO DE CONDICIONES





## Introducción

Para la materialización del proyecto se recoge en dicho documento las condiciones técnicas, económicas, administrativas, facultativas y legales que este debe cumplir para su realización. Estas condiciones están divididas en tres apartados.

El primer apartado corresponde a las condiciones generales, donde se especifica el objeto y el lugar geográfico donde se realiza así como las personas físicas que deben realizarlo.

El segundo apartado hace referencia a las partes que debe contener este documento para estar en regla con la administración.

El tercer y último apartado recoge los medios técnicos necesarios para poder realizar con éxito este proyecto.

## Condiciones generales

El objeto de este proyecto es el desarrollo de un modelo de cálculo para la capacidad seccional de los pilares mixtos tipo *concrete-filled steel* utilizando un algoritmo evolutivo o genético.

La redacción de este documento y las simulaciones que describe deberán ser realizadas con la supervisión del departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción de la Universidad Jaume I, siendo el tutor de dicho proyecto el representante de dicho departamento para este proyecto.

Este proyecto está integrado por un autor, el cual será el responsable de la realización del documento mediante el uso de fuentes propias y externas, las cuales deberán ser incluidas en el apartado de referencias si así fuese; y por un tutor, el cual será responsable de la supervisión del trabajo la verificación de la versión final realizada por el autor.

El documento del proyecto deberá estar adaptado a las normas indicadas en el documento “Normativa TFM de la UJI” y “Normativa UNE 157001-2014”.

Los datos utilizados para la elaboración de los modelos y las comparaciones son obtenidos del departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción de la Universidad Jaume I. Esto datos incluyen ensayos y se para el presente documento no se cuestiona su veracidad y realización.

## **Documentación**

El autor entregará al departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción de la Universitat Jaume I una copia del proyecto, el cual deberá incluir los siguientes documentos:

### **Memoria**

Este documento incluye y explica el proyecto, desde su motivación y justificación a las conclusiones obtenidas tras su realización.

### **Presupuesto**

Recoge el coste económico total al que asciende este proyecto.

### **Pliego de condiciones**

Regula las condiciones del proyecto entre las partes interesadas.

### **Anexos**

Aparece información que desarrolla, apoya o se utiliza en algún apartado de la memoria.

## **Medios técnicos necesarios**

Tanto para la elaboración como para la comprensión de este documento se requiere cierto nivel técnico y este se asumirá durante las explicaciones y las conclusiones obtenidas en el proyecto.

# ANEXO



## Anexo 1. Base de datos de los ensayos

Año	Autor	D mm	t mm	Fy N/mm2	Fc N/mm2	L mm	Nexp kN	Failure mode
1966	Chapman & Neogi	140,10	9,68	270,00	32,60	406,00	2949,00	1
1966	Chapman & Neogi	140,10	9,68	273,00	32,60	406,00	2949,00	1
1966	Chapman & Neogi	140,40	4,93	293,00	33,20	406,00	1824,00	1
1966	Chapman & Neogi	140,40	4,93	302,00	33,20	406,00	1824,00	1
1968	Gardner	168,80	5,00	200,20	33,40	305,00	1966,00	1
1968	Gardner	168,80	5,00	200,20	33,40	305,00	1970,00	1
1968	Gardner	168,80	5,00	200,20	27,90	305,00	1984,00	1
1968	Gardner	168,80	5,00	200,20	27,90	305,00	1984,00	1
1968	Gardner	168,30	3,60	288,40	33,30	305,00	1432,00	1
1968	Gardner	168,30	3,60	288,40	33,30	305,00	1463,00	1
1968	Gardner	168,30	3,60	288,40	27,00	305,00	1557,00	1
1968	Gardner	168,80	2,64	302,40	34,70	305,00	1219,00	1
1968	Gardner	168,80	2,64	302,40	18,20	305,00	1326,00	1
1968	Gardner	169,30	2,62	338,10	37,10	305,00	1308,00	1
1968	Gardner	169,30	2,62	338,10	34,10	305,00	1330,00	1
1978	Zhong (new)	108,60	4,60	271,90	30,70	326,00	757,00	1
1978	Zhong (new)	108,00	4,50	409,64	28,60	340,00	1161,30	1
1978	Zhong (new)	108,00	4,50	409,64	28,60	380,00	1166,20	1
1978	Zhong (new)	108,00	4,50	409,64	28,60	380,00	1210,30	1
1978	Zhong (new)	108,00	4,50	409,64	28,60	290,00	1225,00	1
1978	Zhong (new)	108,00	4,50	409,64	28,60	240,00	1234,80	1

<b>1978</b>	Zhong (new)	108,00	4,50	409,64	28,60	240,00	1244,60	1
<b>1978</b>	Zhong (new)	108,00	4,50	409,64	28,60	285,00	1254,40	1
<b>1978</b>	Zhong (new)	108,00	4,50	409,64	28,60	400,00	1871,80	1
<b>1982</b>	Tang et al	100,00	1,50	232,30	34,85	300,00	505,00	1
<b>1982</b>	Tang et al	100,00	1,50	232,30	36,19	300,00	505,00	1
<b>1982</b>	Tang et al	100,00	2,00	236,20	34,85	300,00	537,00	1
<b>1982</b>	Tang et al	100,00	2,00	236,20	36,19	300,00	537,00	1
<b>1982</b>	Tang et al	210,00	2,50	237,20	26,56	630,00	1637,00	1
<b>1982</b>	Tang et al	210,00	2,50	237,20	27,82	630,00	1637,00	1
<b>1982</b>	Tang et al	210,00	2,50	237,20	26,56	630,00	1637,00	1
<b>1982</b>	Tang et al	100,00	2,50	244,00	34,85	300,00	670,00	1
<b>1982</b>	Tang et al	100,00	2,50	244,00	36,19	300,00	670,00	1
<b>1982</b>	Tang et al	108,00	4,20	259,70	20,54	324,00	916,00	1
<b>1982</b>	Tang et al	108,00	4,50	259,70	20,22	324,00	931,00	1
<b>1982</b>	Tang et al	92,00	3,00	260,70	23,37	276,00	538,00	1
<b>1982</b>	Tang et al	92,00	3,00	260,70	20,71	276,00	538,00	1
<b>1982</b>	Tang et al	300,00	3,00	266,90	24,12	#####	3038,00	1
<b>1982</b>	Tang et al	300,00	3,00	274,40	9,90	#####	2636,00	1
<b>1982</b>	Tang et al	300,00	3,00	274,40	28,72	#####	3420,00	1
<b>1982</b>	Tang et al	106,00	3,00	298,90	36,14	418,00	736,00	1
<b>1982</b>	Tang et al	106,00	3,00	298,90	43,21	278,00	848,00	1
<b>1982</b>	Tang et al	108,00	4,00	332,00	41,17	324,00	970,00	1
<b>1982</b>	Tang et al	108,00	4,00	332,00	39,23	324,00	970,00	1
<b>1982</b>	Tang et al	76,50	1,70	361,60	24,37	153,00	344,00	1
<b>1982</b>	Tang et al	153,00	3,20	413,60	21,54	322,00	1191,00	1

<b>1982</b>	Tang et al	100,00	3,00	426,30	35,17	300,00	777,00	1
<b>1982</b>	Tang et al	100,00	2,50	433,20	45,77	300,00	828,00	1
<b>1982</b>	Tang et al	100,00	2,50	433,20	48,35	300,00	828,00	1
<b>1982</b>	Tang et al	101,50	3,40	602,70	32,68	203,00	1080,00	1
<b>1984</b>	Cai et al	320,00	7,00	249,90	46,57	520,00	5890,00	1
<b>1984</b>	Cai et al	320,00	7,00	249,90	46,57	440,00	5900,00	1
<b>1984</b>	Cai et al	320,00	7,00	249,90	46,57	520,00	6380,00	1
<b>1984</b>	Cai et al	166,00	5,00	274,40	26,56	660,00	1695,00	1
<b>1984</b>	Cai et al	166,00	5,00	274,40	29,62	660,00	1695,00	1
<b>1984</b>	Cai et al	166,00	5,00	274,40	29,62	660,00	1735,00	1
<b>1984</b>	Cai et al	166,00	5,00	274,40	26,56	660,00	1744,00	1
<b>1984</b>	Cai et al	166,00	5,00	274,40	29,62	350,00	1784,00	1
<b>1984</b>	Cai et al	166,00	5,00	274,40	29,62	660,00	1862,00	1
<b>1984</b>	Cai et al	166,00	5,00	274,40	29,62	660,00	1872,00	1
<b>1984</b>	Cai et al	166,00	5,00	274,40	29,62	660,00	1975,00	1
<b>1984</b>	Cai et al	166,00	5,00	274,40	29,62	500,00	1999,00	1
<b>1984</b>	Cai et al	166,00	5,00	274,40	29,62	660,00	2029,00	1
<b>1984</b>	Cai et al	166,00	5,00	274,40	29,62	350,00	2038,00	1
<b>1984</b>	Cai et al	166,00	5,00	274,40	29,62	500,00	2043,00	1
<b>1984</b>	Cai et al	166,00	5,00	274,40	29,62	660,00	2107,00	1
<b>1985</b>	Wang	131,76	2,38	235,00	17,40	264,00	535,00	1
<b>1985</b>	Wang	134,30	3,12	235,00	26,60	264,00	681,00	1
<b>1985</b>	Wang	130,60	4,30	235,00	26,60	264,00	725,00	1
<b>1985</b>	Wang	132,45	5,25	235,00	26,60	264,00	872,00	1
<b>1985</b>	Wang	134,10	6,20	235,00	26,60	264,00	1006,00	1

<b>1985</b>	Sakino	101,80	5,70	305,00	18,00	200,00	954,00	1
<b>1985</b>	Sakino	101,80	5,70	305,00	37,40	200,00	971,00	1
<b>1985</b>	Sakino	101,80	2,94	320,00	18,00	200,00	628,00	1
<b>1985</b>	Sakino	101,80	2,94	320,00	37,40	200,00	660,00	1
<b>1985</b>	Cai et al	108,00	4,00	338,88	28,99	324,00	1058,40	1
<b>1985</b>	Cai et al	108,00	4,00	338,88	28,99	324,00	1073,10	1
<b>1985</b>	Cai et al	108,00	4,00	338,88	28,99	324,00	1117,20	1
<b>1988</b>	Cheng	60,00	3,50	223,00	33,20	240,00	334,00	1
<b>1988</b>	Cheng	88,50	4,00	232,00	33,20	354,00	602,00	1
<b>1988</b>	Cheng	165,00	4,50	254,40	33,20	660,00	1647,00	1
<b>1988</b>	Cheng	114,00	4,50	271,00	33,20	456,00	1033,00	1
<b>1988</b>	Cheng	48,00	3,50	304,00	33,20	192,00	273,00	1
<b>1989</b>	Goode	86,49	2,74	226,70	30,20	270,00	412,00	1
<b>1989</b>	Goode	86,54	2,80	226,70	48,00	270,00	489,00	1
<b>1989</b>	Goode	89,27	4,00	226,70	30,20	270,00	491,00	1
<b>1989</b>	Goode	89,19	4,05	226,70	48,00	270,00	605,00	1
<b>1991</b>	Sakino	179,00	5,50	249,00	22,10	360,00	1410,00	1
<b>1991</b>	Sakino	179,00	5,50	249,00	23,90	360,00	1560,00	1
<b>1991</b>	Sakino	179,00	5,50	249,00	43,70	360,00	2070,00	1
<b>1991</b>	Sakino	179,00	5,50	249,00	43,70	360,00	2080,00	1
<b>1991</b>	Sakino	174,00	3,00	266,00	23,90	360,00	1220,00	1
<b>1991</b>	Sakino	174,00	3,00	266,00	23,90	360,00	1220,00	1
<b>1991</b>	Sakino	174,00	3,00	266,00	45,70	360,00	1640,00	1
<b>1991</b>	Sakino	174,00	3,00	266,00	45,70	360,00	1710,00	1
<b>1991</b>	Sakino	178,00	9,00	283,00	22,20	360,00	2060,00	1



<b>1991</b>	Sakino	178,00	9,00	283,00	22,20	360,00	2120,00	1
<b>1991</b>	Sakino	178,00	9,00	283,00	45,40	360,00	2720,00	1
<b>1991</b>	Sakino	178,00	9,00	283,00	45,40	360,00	2730,00	1
<b>1991</b>	Tsuji	114,30	4,50	339,00	33,40	229,00	1069,00	1
<b>1991</b>	Tsuji	114,30	3,50	350,00	33,40	229,00	969,00	1
<b>1994</b>	O'Shea_Bridge	190,00	1,15	330,00	94,70	662,00	2462,00	0
<b>1994</b>	O'Shea_Bridge	190,00	1,15	330,00	110,30	656,00	2940,00	0
<b>1994</b>	O'Shea_Bridge	190,00	1,15	330,00	110,30	660,00	3000,00	0
<b>1994</b>	O'Shea_Bridge	190,00	1,15	330,00	110,30	662,00	3030,00	0
<b>1994</b>	O'Shea_Bridge	190,00	1,15	330,00	110,30	664,00	3055,00	0
<b>1994</b>	O'Shea_Bridge	190,00	1,15	330,00	110,30	662,00	3140,00	0
<b>1994</b>	Kilpatrick	101,70	2,40	380,00	57,00	356,00	690,00	1
<b>1994</b>	Kilpatrick	101,70	2,40	380,00	57,00	356,00	740,00	1
<b>1994</b>	Kilpatrick	101,70	2,40	380,00	57,00	356,00	770,00	1
<b>1994</b>	Kilpatrick	101,70	2,40	380,00	57,00	356,00	775,00	1
<b>1994</b>	Kilpatrick	101,70	2,40	380,00	57,00	356,00	775,00	1
<b>1994</b>	Kilpatrick	76,00	2,20	390,00	57,00	266,00	420,00	1
<b>1994</b>	Kilpatrick	76,00	2,20	390,00	57,00	266,00	465,00	1
<b>1994</b>	Kilpatrick	76,00	2,20	390,00	57,00	266,00	470,00	1
<b>1994</b>	Kilpatrick	76,00	2,20	390,00	57,00	266,00	480,00	1
<b>1995</b>	Kato	298,50	5,74	299,80	82,40	895,50	7938,00	1
<b>1995</b>	Han	111,30	2,00	354,60	60,75	339,00	855,00	1
<b>1995</b>	Matsui	165,20	4,17	358,70	40,90	660,80	1594,00	1
<b>1995</b>	Kato	301,50	4,50	381,20	27,70	904,50	3851,00	1
<b>1995</b>	Kato	301,50	4,50	381,20	35,60	904,50	4547,00	1

<b>1995</b>	Kato	298,40	7,65	384,20	27,70	895,20	4919,00	1
<b>1995</b>	Kato	298,40	7,65	384,20	35,50	895,20	5821,00	1
<b>1995</b>	Kato	298,40	7,65	384,20	82,40	895,20	8388,00	1
<b>1996</b>	Han	113,60	3,20	354,60	60,75	338,00	1145,00	1
<b>1997</b>	Bridge & O'Shea	190,00	1,13	185,70	41,00	664,50	1376,60	0
<b>1997</b>	Bridge & O'Shea	190,00	1,13	185,70	80,20	662,50	2295,00	0
<b>1997</b>	Bridge & O'Shea	190,00	1,13	185,70	108,00	660,00	3058,00	0
<b>1997</b>	Bridge & O'Shea	190,00	1,94	256,40	41,00	663,50	1678,20	0
<b>1997</b>	Bridge & O'Shea	190,00	1,94	256,40	41,00	663,50	1678,20	0
<b>1997</b>	Bridge & O'Shea	190,00	1,94	256,40	74,70	663,50	2592,00	0
<b>1997</b>	Bridge & O'Shea	190,00	1,94	256,40	74,70	663,50	2592,00	0
<b>1997</b>	Bridge & O'Shea	190,00	1,94	256,40	108,00	660,00	3360,00	0
<b>1997</b>	Bridge & O'Shea	190,00	1,94	256,40	108,00	660,00	3360,00	0
<b>1997</b>	Bridge & O'Shea	190,00	1,52	306,10	48,30	664,50	1694,80	0
<b>1997</b>	Bridge & O'Shea	190,00	1,52	306,10	48,30	664,50	1694,80	0
<b>1997</b>	Bridge & O'Shea	190,00	1,52	306,10	80,20	663,50	2602,00	0
<b>1997</b>	Bridge & O'Shea	190,00	1,52	306,10	80,20	663,50	2602,00	0
<b>1997</b>	Bridge & O'Shea	190,00	1,52	306,10	108,00	661,50	3260,00	0
<b>1997</b>	Bridge & O'Shea	190,00	1,52	306,10	108,00	661,50	3260,00	0
<b>1997</b>	Han	114,80	3,90	357,70	60,75	338,00	1116,00	1
<b>1997</b>	Bridge & O'Shea	165,00	2,82	363,30	48,30	580,50	1661,60	1
<b>1997</b>	Bridge & O'Shea	165,00	2,82	363,30	48,30	580,50	1661,60	1
<b>1997</b>	Bridge & O'Shea	165,00	2,82	363,30	80,20	580,50	2295,00	1

<b>1997</b>	Bridge & O'Shea	165,00	2,82	363,30	80,20	580,50	2295,00	1
<b>1997</b>	Bridge & O'Shea	165,00	2,82	363,30	108,00	577,50	2673,00	1
<b>1997</b>	Bridge & O'Shea	165,00	2,82	363,30	108,00	577,50	2673,00	1
<b>1998</b>	Han	115,90	4,90	309,50	60,75	356,00	1174,00	1
<b>1999</b>	Tan et al	125,00	1,00	232,00	106,02	438,00	1239,00	0
<b>1999</b>	Tan et al	125,00	1,00	232,00	106,02	438,00	1275,00	0
<b>1999</b>	Tan et al	127,00	2,00	258,00	106,02	445,00	1339,00	1
<b>1999</b>	Tan et al	127,00	2,00	258,00	106,02	445,00	1491,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	101,30	1,50	264,90	21,90	310,00	370,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	102,30	1,52	264,90	21,90	310,00	485,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	105,00	2,06	264,90	18,40	310,00	539,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	104,20	2,44	264,90	21,90	310,00	450,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	105,10	2,85	264,90	18,40	310,00	550,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	107,90	4,32	264,90	18,40	310,00	686,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	107,90	4,32	264,90	18,40	424,00	727,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	107,90	4,32	264,90	18,40	424,00	734,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	107,90	4,32	264,90	18,40	424,00	803,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	115,90	4,90	309,50	42,70	340,00	1102,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	115,90	4,90	309,50	42,70	356,00	1122,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	115,90	4,90	309,50	42,70	357,00	1140,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	115,90	4,90	309,50	42,70	344,00	1234,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	264,40	4,50	323,40	21,90	812,00	3357,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	264,60	4,55	323,40	21,90	812,00	3579,00	1

<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	265,00	4,75	323,40	21,90	812,00	3789,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	130,10	2,30	324,30	42,70	396,00	1240,00	1
<b>1999</b>	Han	130,60	2,30	324,30	60,75	396,00	1250,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	133,10	4,50	324,30	42,70	397,00	1440,00	1
<b>1999</b>	Saisho	139,80	2,78	341,00	25,40	419,40	931,00	1
<b>1999</b>	Saisho	139,80	2,78	341,00	27,70	419,40	950,00	1
<b>1999</b>	Saisho	139,80	2,78	341,00	57,30	419,40	1313,00	1
<b>1999</b>	Saisho	139,80	2,78	341,00	57,30	419,40	1323,00	1
<b>1999</b>	Saisho	139,80	2,78	341,00	57,30	419,40	1391,00	1
<b>1999</b>	Saisho	139,80	2,78	341,00	117,00	419,40	1960,00	1
<b>1999</b>	Saisho	139,80	2,78	341,00	135,60	419,40	2048,00	1
<b>1999</b>	Saisho	139,80	2,78	341,00	117,00	419,40	2067,00	1
<b>1999</b>	Saisho	139,80	2,78	341,00	135,60	419,40	2077,00	1
<b>1999</b>	Saisho	139,80	2,78	341,00	135,60	419,40	2087,00	1
<b>1999</b>	Lahlou_Lachemi	115,08	8,40	344,00	120,00	342,70	2031,00	1
<b>1999</b>	Lahlou_Lachemi	114,82	8,42	344,00	120,00	343,20	2107,00	1
<b>1999</b>	Tan et al	133,00	3,50	352,00	106,02	465,00	1962,00	1
<b>1999</b>	Tan et al	133,00	3,50	352,00	106,02	465,00	1991,00	1
<b>1999</b>	Tan et al	133,00	3,50	352,00	106,02	465,00	1995,00	1
<b>1999</b>	Tan et al	133,00	4,70	352,00	106,02	465,00	2158,00	1
<b>1999</b>	Tan et al	133,00	4,70	352,00	106,02	465,00	2253,00	1
<b>1999</b>	Tan et al	133,00	4,70	352,00	106,02	465,00	2273,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	111,30	2,00	354,60	42,70	399,00	840,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	113,60	3,20	354,60	42,70	338,00	1091,00	1

<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	113,60	3,20	354,60	42,70	336,00	1139,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	113,60	3,20	354,60	42,70	337,00	1141,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	153,90	1,80	356,10	18,40	470,00	981,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	155,60	2,63	356,10	23,00	470,00	1300,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	154,20	2,65	356,10	18,40	470,00	1294,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	159,80	5,08	356,10	21,90	470,00	1746,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	159,30	5,25	356,10	21,90	470,00	1577,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	160,20	5,40	356,10	21,90	470,00	1775,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	114,80	3,90	357,70	42,70	343,00	1030,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	114,80	3,90	357,70	42,70	335,00	1041,00	1
<b>1999</b>	Zhong (Harbin)	114,80	3,90	357,70	42,70	338,00	1110,00	1
<b>1999</b>	Saisho	101,60	2,96	377,30	25,40	304,80	676,00	1
<b>1999</b>	Saisho	101,60	2,96	377,30	62,40	304,80	901,00	1
<b>1999</b>	Saisho	101,60	2,99	377,30	27,70	304,80	715,00	1
<b>1999</b>	Saisho	101,60	2,99	377,30	29,40	304,80	715,00	1
<b>1999</b>	Saisho	101,60	2,99	377,30	62,40	304,80	921,00	1
<b>1999</b>	Saisho	101,60	2,99	377,30	62,40	304,80	921,00	1
<b>1999</b>	Saisho	101,60	2,99	377,30	135,60	304,80	1185,00	1
<b>1999</b>	Saisho	101,60	3,00	377,30	117,00	304,80	1117,00	1
<b>1999</b>	Saisho	101,60	3,00	377,30	117,00	304,80	1195,00	1
<b>1999</b>	Tan et al	127,00	7,00	429,00	106,02	445,00	3364,00	1
<b>1999</b>	Tan et al	127,00	7,00	429,00	106,02	445,00	3370,00	1
<b>1999</b>	Tan et al	127,00	7,00	429,00	106,02	445,00	3404,00	1
<b>1999</b>	Lahlou_Lachemi	114,28	3,19	457,00	118,00	342,50	1786,00	1

<b>1999</b>	Lahlou_Lachemi	114,32	3,19	457,00	118,00	343,00	1786,00	1
<b>1999</b>	Lahlou_Lachemi	114,38	3,19	457,00	57,60	343,00	1165,00	1
<b>1999</b>	Lahlou_Lachemi	114,38	3,19	457,00	56,60	343,00	1201,00	1
<b>1999</b>	Lahlou_Lachemi	114,53	3,19	457,00	90,20	343,20	1501,00	1
<b>1999</b>	Lahlou_Lachemi	114,53	3,19	457,00	90,20	344,30	1522,00	1
<b>1999</b>	Saisho	139,80	2,37	462,60	27,70	419,40	1078,00	1
<b>1999</b>	Saisho	139,80	2,37	462,60	27,70	419,40	1098,00	1
<b>1999</b>	Saisho	139,80	2,37	462,60	27,70	419,40	1107,00	1
<b>1999</b>	Saisho	139,80	2,37	462,60	62,40	419,40	1558,00	1
<b>1999</b>	Saisho	139,80	2,37	462,60	70,80	419,40	1577,00	1
<b>1999</b>	Saisho	139,80	2,37	462,60	70,80	419,40	1577,00	1
<b>1999</b>	Saisho	139,80	2,37	462,60	70,80	419,40	1626,00	1
<b>1999</b>	Saisho	139,80	2,37	462,60	135,60	419,40	2136,00	1
<b>1999</b>	Saisho	139,80	2,37	462,60	135,60	419,40	2165,00	1
<b>1999</b>	Saisho	139,80	2,37	462,60	135,60	419,40	2175,00	1
<b>2000</b>	Han	133,10	4,50	324,30	60,75	397,00	1535,00	1
<b>2000</b>	Yamamoto	318,30	10,37	335,00	24,20	955,00	6565,00	1
<b>2000</b>	Yamamoto	318,30	10,37	335,00	39,20	955,00	7933,00	1
<b>2000</b>	Yamamoto	318,50	10,37	335,00	52,20	955,00	8289,00	1
<b>2000</b>	Yamamoto	101,30	3,03	371,00	40,20	305,00	742,00	1
<b>2000</b>	Yamamoto	101,40	3,03	371,00	23,20	305,00	660,00	1
<b>2000</b>	Yamamoto	101,50	3,03	371,00	51,30	305,00	862,00	1
<b>2000</b>	Yamamoto	101,70	3,03	371,00	40,20	305,00	800,00	1

<b>2000</b>	Yamamoto	101,80	3,03	371,00	23,20	305,00	682,00	1
<b>2000</b>	Yamamoto	101,90	3,03	371,00	23,20	305,00	649,00	1
<b>2000</b>	Yamamoto	101,90	3,03	371,00	51,30	305,00	877,00	1
<b>2000</b>	Yamamoto	216,40	6,61	452,00	24,30	649,00	3568,00	1
<b>2000</b>	Yamamoto	216,40	6,61	452,00	38,20	649,00	4023,00	1
<b>2000</b>	Yamamoto	216,40	6,61	452,00	46,80	649,00	4214,00	1
<b>2001</b>	Kodur_Wang	168,30	10,00	430,50	91,80	500,00	3250,00	1
<b>2001</b>	Kodur_Wang	168,30	10,00	430,50	97,00	500,00	3400,00	1
<b>2001</b>	Han	141,80	4,30	433,00	60,75	419,00	1618,00	1
<b>2001</b>	Kodur_Wang	168,30	5,00	438,00	36,50	500,00	2360,00	1
<b>2001</b>	Kodur_Wang	168,30	5,00	438,00	37,30	500,00	2360,00	1
<b>2001</b>	Kodur_Wang	168,30	5,00	438,00	99,50	500,00	3250,00	1
<b>2001</b>	Kodur_Wang	168,30	5,00	438,00	100,00	500,00	3250,00	1
<b>2001</b>	Kodur_Wang	168,30	10,00	480,00	87,80	500,00	4550,00	1
<b>2001</b>	Kodur_Wang	168,30	10,00	480,00	90,80	500,00	4550,00	1
<b>2002</b>	Yu et al.	165,00	1,00	338,00	91,80	500,00	1372,00	0
<b>2002</b>	Yu et al.	165,00	1,00	338,00	91,80	500,00	1430,00	0
<b>2002</b>	Yu et al.	165,00	1,00	338,00	91,80	500,00	1773,00	0
<b>2002</b>	Yu et al.	165,00	1,00	338,00	91,80	500,00	2038,00	0
<b>2002</b>	Yu et al.	165,00	2,00	338,00	91,80	500,00	1920,00	1
<b>2002</b>	Yu et al.	165,00	2,00	338,00	91,80	500,00	1930,00	1
<b>2002</b>	Yu et al.	165,00	2,00	338,00	91,80	500,00	2077,00	1
<b>2002</b>	Yu et al.	165,00	2,00	338,00	91,80	500,00	2244,00	1

<b>2002</b>	Yu et al.	165,00	2,00	338,00	91,80	500,00	2381,00	1
<b>2002</b>	Yu et al.	165,00	3,00	338,00	91,80	500,00	2567,00	1
<b>2002</b>	Yu et al.	165,00	3,00	338,00	91,80	500,00	2714,00	1
<b>2002</b>	Yu et al.	165,00	3,00	338,00	91,80	500,00	2734,00	1
<b>2002</b>	Yu et al.	165,00	4,00	338,00	91,80	500,00	2704,00	1
<b>2002</b>	Yu et al.	165,00	4,00	338,00	91,80	500,00	2773,00	1
<b>2002</b>	Yu et al.	165,00	4,00	338,00	91,80	500,00	2832,00	1
<b>2002</b>	Yu et al.	151,00	2,00	405,00	87,10	500,00	1933,00	1
<b>2002</b>	Yu et al.	151,00	2,00	405,00	87,10	500,00	2132,00	1
<b>2002</b>	Yu et al.	159,00	6,00	405,00	87,10	500,00	2957,00	1
<b>2002</b>	Yu et al.	159,00	6,00	405,00	87,10	500,00	3099,00	1
<b>2002</b>	Yu et al.	149,00	3,00	438,00	87,10	500,00	2337,00	1
<b>2002</b>	Yu et al.	149,00	3,00	438,00	87,10	500,00	2361,00	1
<b>2002</b>	Yu et al.	149,00	3,00	438,00	87,10	500,00	2394,00	1
<b>2002</b>	Yu et al.	151,00	4,50	438,00	87,10	500,00	2572,00	1
<b>2002</b>	Yu et al.	151,00	4,50	438,00	87,10	500,00	2727,00	1
<b>2002</b>	Yu et al.	151,00	4,50	438,00	87,10	500,00	2743,00	1
<b>2002</b>	Yu et al.	159,00	8,00	438,00	87,10	500,00	3173,00	1
<b>2002</b>	Yu et al.	159,00	8,00	438,00	87,10	500,00	3267,00	1
<b>2002</b>	Yu et al.	159,00	8,00	438,00	87,10	500,00	3330,00	1
<b>2002</b>	Han	159,80	6,30	482,50	60,75	476,00	3123,00	1
<b>2003</b>	Uenaka et al	157,70	2,14	286,00	18,70	450,00	907,50	1
<b>2003</b>	Han & Yao	100,00	3,00	303,50	46,80	300,00	708,00	1
<b>2003</b>	Han & Yao	100,00	3,00	303,50	46,80	300,00	766,00	1
<b>2003</b>	Han & Yao	100,00	3,00	303,50	46,80	300,00	780,00	1



<b>2003</b>	Han & Yao	100,00	3,00	303,50	46,80	300,00	814,00	1
<b>2003</b>	Han & Yao	100,00	3,00	303,50	46,80	300,00	820,00	1
<b>2003</b>	Han & Yao	100,00	3,00	303,50	46,80	300,00	820,00	1
<b>2003</b>	Han & Yao	200,00	3,00	303,50	46,80	600,00	2160,00	1
<b>2003</b>	Han & Yao	200,00	3,00	303,50	46,80	600,00	2160,00	1
<b>2003</b>	Han & Yao	200,00	3,00	303,50	46,80	600,00	2256,00	1
<b>2003</b>	Han & Yao	200,00	3,00	303,50	46,80	600,00	2320,00	1
<b>2003</b>	Han & Yao	200,00	3,00	303,50	46,80	600,00	2330,00	1
<b>2003</b>	Han & Yao	200,00	3,00	303,50	46,80	600,00	2383,00	1
<b>2003</b>	Uenaka et al	157,50	1,50	308,00	18,70	450,00	815,40	0
<b>2003</b>	Zhang	139,90	3,48	325,30	35,70	419,00	1300,00	1
<b>2003</b>	Zhang	139,90	3,54	325,30	35,70	421,00	1242,00	1
<b>2003</b>	Zhang	139,90	3,58	325,30	35,70	416,00	1222,00	1
<b>2003</b>	Zhang	140,00	3,60	325,30	49,10	418,00	1582,00	1
<b>2003</b>	Zhang	139,70	3,61	325,30	49,10	420,00	1540,00	1
<b>2003</b>	Zhang	140,30	3,62	325,30	49,10	418,00	1582,00	1
<b>2003</b>	Zhang	138,70	3,28	331,70	61,70	418,00	1680,00	1
<b>2003</b>	Zhang	138,90	3,28	331,70	61,70	420,00	1688,00	1
<b>2003</b>	Zhang	138,90	3,29	331,70	35,70	419,00	1140,00	1
<b>2003</b>	Zhang	139,00	3,29	331,70	35,70	419,00	1220,00	1
<b>2003</b>	Zhang	139,00	3,29	331,70	61,70	418,00	1629,00	1
<b>2003</b>	Zhang	138,60	3,30	331,70	50,00	420,00	1500,00	1
<b>2003</b>	Zhang	138,60	3,31	331,70	50,00	418,00	1490,00	1
<b>2003</b>	Zhang	138,90	3,36	331,70	50,00	420,00	1520,00	1
<b>2003</b>	Zhang	139,50	3,37	331,70	35,70	419,00	1180,00	1

<b>2003</b>	Bai & Li	164,00	3,80	342,00	24,20	520,00	1639,00	1
<b>2003</b>	Zhang	133,20	5,03	351,00	56,50	396,00	1770,00	1
<b>2003</b>	Zhang	133,10	5,04	351,00	61,70	397,00	1955,00	1
<b>2003</b>	Zhang	133,20	5,06	351,00	37,20	397,00	1580,00	1
<b>2003</b>	Zhang	133,20	5,07	351,00	56,50	397,00	1835,00	1
<b>2003</b>	Zhang	133,30	5,10	351,00	61,70	396,00	1930,00	1
<b>2003</b>	Zhang	133,40	5,17	351,00	56,50	396,00	1810,00	1
<b>2003</b>	Zhang	133,40	5,20	351,00	61,70	396,00	1955,00	1
<b>2003</b>	Zhang	133,40	5,21	351,00	37,20	396,00	1612,00	1
<b>2003</b>	Zhang	133,40	5,23	351,00	37,20	398,00	1640,00	1
<b>2003</b>	Zhang	167,40	3,32	354,00	40,60	503,00	1704,00	1
<b>2003</b>	Zhang	167,10	3,33	354,00	56,50	503,00	2105,00	1
<b>2003</b>	Zhang	167,50	3,33	354,00	40,60	503,00	1700,00	1
<b>2003</b>	Zhang	167,80	3,33	354,00	56,50	504,00	2055,00	1
<b>2003</b>	Zhang	167,30	3,35	354,00	40,60	502,00	1668,00	1
<b>2003</b>	Zhang	167,00	3,37	354,00	56,50	503,00	2075,00	1
<b>2003</b>	Zhang	160,20	5,01	356,30	61,70	476,00	2440,00	1
<b>2003</b>	Zhang	159,30	5,07	356,30	61,70	478,00	2460,00	1
<b>2003</b>	Zhang	159,30	5,36	356,30	61,70	477,00	2480,00	1
<b>2003</b>	Bai & Li	159,00	6,30	360,00	24,20	520,00	2177,00	1
<b>2003</b>	Bai & Li	159,00	4,80	366,00	24,20	520,00	1907,00	1
<b>2003</b>	Han	165,70	5,10	373,30	60,75	497,00	2309,00	1
<b>2003</b>	Bai & Li	159,00	5,20	379,00	24,20	520,00	2037,00	1
<b>2003</b>	Zhang	133,10	5,43	392,00	61,70	397,00	1930,00	1
<b>2003</b>	Zhang	133,30	5,43	392,00	61,70	397,00	1820,00	1

<b>2003</b>	Zhang	133,10	5,44	392,00	61,70	397,00	1915,00	1
<b>2004</b>	Tao, Han, Zhao	180,00	3,00	275,90	40,56	540,00	1618,00	1
<b>2004</b>	Tao, Han, Zhao	180,00	3,00	275,90	40,56	540,00	1680,00	1
<b>2004</b>	Sakino et al	300,00	2,96	279,00	41,10	900,00	3152,00	1
<b>2004</b>	Sakino et al	300,00	2,96	279,00	41,10	900,00	3277,00	1
<b>2004</b>	Sakino et al	301,00	2,96	279,00	25,40	903,00	2382,00	1
<b>2004</b>	Sakino et al	301,00	2,96	279,00	80,30	903,00	5540,00	1
<b>2004</b>	Han_Yao	100,00	3,00	303,50	52,76	300,00	708,00	1
<b>2004</b>	Han_Yao	100,00	3,00	303,50	52,76	300,00	766,00	1
<b>2004</b>	Han_Yao	100,00	3,00	303,50	52,76	300,00	780,00	1
<b>2004</b>	Han_Yao	100,00	3,00	303,50	52,76	300,00	814,00	1
<b>2004</b>	Han_Yao	100,00	3,00	303,50	52,76	300,00	820,00	1
<b>2004</b>	Han_Yao	100,00	3,00	303,50	52,76	300,00	820,00	1
<b>2004</b>	Han_Yao	200,00	3,00	303,50	52,76	600,00	2160,00	1
<b>2004</b>	Han_Yao	200,00	3,00	303,50	52,76	600,00	2160,00	1
<b>2004</b>	Han_Yao	200,00	3,00	303,50	52,76	600,00	2256,00	1
<b>2004</b>	Han_Yao	200,00	3,00	303,50	52,76	600,00	2320,00	1
<b>2004</b>	Han_Yao	200,00	3,00	303,50	52,76	600,00	2330,00	1
<b>2004</b>	Han_Yao	200,00	3,00	303,50	52,76	600,00	2383,00	1
<b>2004</b>	Sakino et al	149,00	2,96	308,00	25,40	447,00	941,00	1
<b>2004</b>	Sakino et al	149,00	2,96	308,00	40,50	447,00	1064,00	1
<b>2004</b>	Sakino et al	149,00	2,96	308,00	40,50	447,00	1080,00	1
<b>2004</b>	Sakino et al	149,00	2,96	308,00	77,00	447,00	1781,00	1
<b>2004</b>	Giakoumelis & Lam	114,29	3,75	343,00	46,10	300,00	1067,00	1

<b>2004</b>	Giakoumelis & Lam	114,49	3,75	343,00	46,10	299,30	1038,00	1
<b>2004</b>	Giakoumelis & Lam	114,43	3,82	343,00	27,80	300,00	929,00	1
<b>2004</b>	Giakoumelis & Lam	114,54	3,84	343,00	79,10	300,00	1359,00	1
<b>2004</b>	Giakoumelis & Lam	114,09	3,85	343,00	25,50	300,50	948,00	1
<b>2004</b>	Giakoumelis & Lam	114,30	3,85	343,00	25,50	300,00	998,00	1
<b>2004</b>	Giakoumelis & Lam	114,37	3,85	343,00	79,10	299,50	1182,00	1
<b>2004</b>	Giakoumelis & Lam	114,00	3,87	343,00	0,10	298,90	539,00	1
<b>2004</b>	Giakoumelis & Lam	114,26	3,93	343,00	77,80	300,00	1359,00	1
<b>2004</b>	Giakoumelis & Lam	114,43	3,98	343,00	25,10	300,00	948,00	1
<b>2004</b>	Giakoumelis & Lam	114,57	3,99	343,00	74,90	300,00	1308,00	1
<b>2004</b>	Giakoumelis & Lam	114,88	4,91	343,00	27,80	300,50	1380,00	1
<b>2004</b>	Giakoumelis & Lam	115,04	4,92	343,00	83,90	300,00	1787,00	1
<b>2004</b>	Giakoumelis & Lam	115,02	5,02	343,00	46,10	300,50	1413,00	1
<b>2004</b>	Giakoumelis & Lam	115,04	5,02	343,00	0,10	300,00	805,80	1
<b>2004</b>	Sakino et al	238,00	4,54	507,00	40,50	714,00	3583,00	1
<b>2004</b>	Sakino et al	238,00	4,54	507,00	40,50	714,00	3647,00	1
<b>2004</b>	Sakino et al	238,00	4,54	507,00	77,00	714,00	5578,00	1
<b>2004</b>	Sakino et al	239,00	4,54	507,00	25,40	717,00	3035,00	1
<b>2004</b>	Sakino et al	360,00	4,54	525,00	41,10	#####	7045,00	1
<b>2004</b>	Sakino et al	360,00	4,54	525,00	85,10	#####	11505,00	1
<b>2004</b>	Sakino et al	361,00	4,54	525,00	25,40	#####	5633,00	1
<b>2004</b>	Sakino et al	361,00	4,54	525,00	41,10	#####	7260,00	1

<b>2004</b>	Sakino et al	122,00	4,54	576,00	25,40	366,00	1509,00	1
<b>2004</b>	Sakino et al	122,00	4,54	576,00	40,50	366,00	1657,00	1
<b>2004</b>	Sakino et al	122,00	4,54	576,00	40,50	366,00	1663,00	1
<b>2004</b>	Sakino et al	122,00	4,54	576,00	77,00	366,00	2100,00	1
<b>2006</b>	Ellobody et al	238,00	4,54	507,00	0,10	714,00	1768,00	1
<b>2006</b>	Ellobody et al	238,00	4,54	507,00	40,50	714,00	3647,00	1
<b>2006</b>	Ellobody et al	238,00	4,54	507,00	77,00	714,00	5578,00	1
<b>2006</b>	Ellobody et al	239,00	4,54	507,00	25,40	717,00	3035,00	1
<b>2006</b>	Ellobody et al	360,00	4,54	525,00	85,10	#####	11505,00	1
<b>2006</b>	Ellobody et al	361,00	4,54	525,00	35,40	#####	5633,00	1
<b>2006</b>	Ellobody et al	361,00	4,54	525,00	41,10	#####	7260,00	1
<b>2007</b>	Beck et al.	114,30	3,35	287,33	32,68	343,00	737,00	1
<b>2007</b>	Beck et al.	114,30	3,35	287,33	58,68	343,00	952,00	1
<b>2007</b>	Beck et al.	114,30	3,35	287,33	88,78	343,00	1136,20	1
<b>2007</b>	Beck et al.	114,30	3,35	287,33	105,45	343,00	1453,10	1
<b>2007</b>	Beck et al.	114,30	6,00	342,95	32,68	343,00	1075,40	1
<b>2007</b>	Beck et al.	114,30	6,00	342,95	58,68	343,00	1329,10	1
<b>2007</b>	Beck et al.	114,30	6,00	342,95	73,30	343,00	1361,60	1
<b>2007</b>	Beck et al.	114,30	6,00	342,95	88,78	343,00	1496,00	1
<b>2007</b>	Beck et al.	114,30	6,00	342,95	105,45	343,00	1683,40	1
<b>2007</b>	Yu, Ding, Cai	165,00	2,72	350,00	55,26	510,00	1750,00	1
<b>2007</b>	Yu, Ding, Cai	165,00	2,73	350,00	78,74	510,00	2080,00	1
<b>2007</b>	Yu, Ding, Cai	165,00	2,75	350,00	42,81	510,00	1560,00	1

<b>2007</b>	Yu, Ding, Cai	219,00	4,72	350,00	47,70	650,00	3350,00	1
<b>2007</b>	Yu, Ding, Cai	219,00	4,75	350,00	38,51	650,00	3150,00	1
<b>2007</b>	Yu, Ding, Cai	219,00	4,78	350,00	47,70	650,00	3400,00	1
<b>2007</b>	Gupta	89,32	2,74	360,00	16,31	340,00	494,00	1
<b>2007</b>	Gupta	89,32	2,74	360,00	19,48	340,00	494,00	1
<b>2007</b>	Gupta	89,32	2,74	360,00	18,31	340,00	524,00	1
<b>2007</b>	Gupta	89,32	2,74	360,00	12,89	340,00	530,00	1
<b>2007</b>	Gupta	89,32	2,74	360,00	20,36	340,00	540,00	1
<b>2007</b>	Gupta	89,32	2,74	360,00	29,00	340,00	552,00	1
<b>2007</b>	Gupta	89,32	2,74	360,00	13,13	340,00	557,00	1
<b>2007</b>	Gupta	89,32	2,74	360,00	21,14	340,00	560,00	1
<b>2007</b>	Gupta	89,32	2,74	360,00	19,82	340,00	571,00	1
<b>2007</b>	Gupta	89,32	2,74	360,00	30,58	340,00	577,00	1
<b>2007</b>	Gupta	89,32	2,74	360,00	16,16	340,00	582,00	1
<b>2007</b>	Gupta	89,32	2,74	360,00	27,68	340,00	599,00	1
<b>2007</b>	Gupta	89,32	2,74	360,00	24,12	340,00	599,00	1
<b>2007</b>	Gupta	89,32	2,74	360,00	23,00	340,00	603,00	1
<b>2007</b>	Gupta	89,32	2,74	360,00	30,57	340,00	605,00	1
<b>2007</b>	Gupta	89,32	2,74	360,00	26,56	340,00	605,00	1
<b>2007</b>	Gupta	89,32	2,74	360,00	16,11	340,00	610,00	1
<b>2007</b>	Gupta	89,32	2,74	360,00	22,41	340,00	613,00	1
<b>2007</b>	Gupta	89,32	2,74	360,00	32,43	340,00	620,00	1
<b>2007</b>	Gupta	89,32	2,74	360,00	28,77	340,00	620,00	1
<b>2007</b>	Gupta	89,32	2,74	360,00	19,48	340,00	630,00	1
<b>2007</b>	Gupta	89,32	2,74	360,00	20,22	340,00	635,00	1

<b>2007</b>	Gupta	89,32	2,74	360,00	29,79	340,00	644,00	1
<b>2007</b>	Gupta	89,32	2,74	360,00	29,98	340,00	650,00	1
<b>2007</b>	Gupta	112,56	2,89	360,00	18,31	340,00	635,00	1
<b>2007</b>	Gupta	112,56	2,89	360,00	12,89	340,00	650,00	1
<b>2007</b>	Gupta	112,56	2,89	360,00	13,13	340,00	674,00	1
<b>2007</b>	Gupta	112,56	2,89	360,00	21,14	340,00	681,00	1
<b>2007</b>	Gupta	112,56	2,89	360,00	20,36	340,00	686,00	1
<b>2007</b>	Gupta	112,56	2,89	360,00	19,82	340,00	687,00	1
<b>2007</b>	Gupta	112,56	2,89	360,00	16,16	340,00	700,00	1
<b>2007</b>	Gupta	112,56	2,89	360,00	19,48	340,00	716,00	1
<b>2007</b>	Gupta	112,56	2,89	360,00	16,31	340,00	720,00	1
<b>2007</b>	Gupta	112,56	2,89	360,00	30,58	340,00	727,00	1
<b>2007</b>	Gupta	112,56	2,89	360,00	20,22	340,00	730,00	1
<b>2007</b>	Gupta	112,56	2,89	360,00	23,00	340,00	735,00	1
<b>2007</b>	Gupta	112,56	2,89	360,00	19,48	340,00	745,00	1
<b>2007</b>	Gupta	112,56	2,89	360,00	22,41	340,00	745,00	1
<b>2007</b>	Gupta	112,56	2,89	360,00	29,00	340,00	747,00	1
<b>2007</b>	Gupta	112,56	2,89	360,00	16,11	340,00	754,00	1
<b>2007</b>	Gupta	112,56	2,89	360,00	28,77	340,00	755,00	1
<b>2007</b>	Gupta	112,56	2,89	360,00	30,57	340,00	757,00	1
<b>2007</b>	Gupta	112,56	2,89	360,00	24,12	340,00	758,00	1
<b>2007</b>	Gupta	112,56	2,89	360,00	26,56	340,00	770,00	1
<b>2007</b>	Gupta	112,56	2,89	360,00	27,68	340,00	785,00	1
<b>2007</b>	Gupta	112,56	2,89	360,00	32,43	340,00	788,00	1
<b>2007</b>	Gupta	112,56	2,89	360,00	29,98	340,00	801,00	1

<b>2007</b>	Gupta	112,56	2,89	360,00	29,79	340,00	822,00	1
<b>2008</b>	Yu, Tao, Wu	100,00	1,90	404,00	130,37	300,00	1085,00	1
<b>2008</b>	Yu, Tao, Wu	100,00	1,90	404,00	130,37	300,00	1100,00	1
<b>2008</b>	Yu, Tao, Wu	100,00	1,90	404,00	130,37	300,00	1125,00	1
<b>2008</b>	Yu, Tao, Wu	100,00	1,90	404,00	130,37	300,00	1170,00	1
<b>2009</b>	Oliveira et al.	114,30	3,35	287,33	18,12	342,90	737,00	1
<b>2009</b>	Oliveira et al.	114,30	3,35	287,33	58,70	342,90	952,00	1
<b>2009</b>	Oliveira et al.	114,30	3,35	287,33	88,80	342,90	1136,20	1
<b>2009</b>	Oliveira et al.	114,30	3,35	287,33	105,50	342,90	1453,10	1
<b>2010</b>	Uenaka, Kitoh, sonoda	158,00	2,14	286,00	18,70	450,00	907,50	1
<b>2010</b>	Uenaka, Kitoh, sonoda	158,00	1,50	308,00	18,70	450,00	815,40	0
<b>2012</b>	Xiong Riu et al.	165,00	4,00	210,00	27,50	495,00	1557,00	1
<b>2012</b>	Xiong Riu et al.	165,00	4,00	210,00	27,50	495,00	1630,00	1
<b>2012</b>	Xiong Riu et al.	165,00	4,00	210,00	27,50	495,00	1650,00	1
<b>2012</b>	Xiong Riu et al.	165,00	4,00	210,00	27,50	495,00	1660,00	1
<b>2012</b>	Xiong Riu et al.	165,00	4,00	210,00	27,50	495,00	1680,00	1
<b>2013</b>	Abed	167,00	3,10	300,00	44,00	350,00	1710,00	1
<b>2013</b>	Abed	167,00	3,10	300,00	60,00	350,00	1873,00	1
<b>2013</b>	Abed	114,00	3,60	300,00	44,00	250,00	1042,00	1
<b>2013</b>	Abed	114,00	3,60	300,00	60,00	250,00	1095,00	1
<b>2013</b>	Abed	114,00	5,60	300,00	44,00	250,00	1314,00	1
<b>2013</b>	Abed	114,00	5,60	300,00	60,00	250,00	1365,00	1



<b>2014</b>	Lai, Ho	114,00	5,00	365,00	114,30	330,00	1875,00	1
<b>2014</b>	Lai, Ho	168,30	5,00	365,00	29,10	330,00	1908,00	1
<b>2014</b>	Lai, Ho	168,30	5,00	365,00	85,40	330,00	2926,00	1
<b>2014</b>	Lai, Ho	168,30	8,00	365,00	34,10	330,00	2810,00	1
<b>2014</b>	Lai, Ho	168,30	8,00	365,00	75,20	330,00	3101,00	1
<b>2014</b>	Lai, Ho	139,00	10,00	365,00	27,20	330,00	2510,00	1
<b>2014</b>	Lai, Ho	139,00	10,00	365,00	47,00	330,00	2750,00	1
<b>2014</b>	Lai, Ho	139,00	10,00	365,00	89,40	330,00	2966,00	1
<b>2014</b>	Lai, Ho	139,00	10,00	365,00	120,00	330,00	3208,00	1
<b>2014</b>	Lai, Ho	168,30	10,00	365,00	27,00	330,00	3232,00	1
<b>2014</b>	Lai, Ho	168,30	10,00	365,00	95,10	330,00	3930,00	1
<b>2014</b>	Ren et al.	165,00	2,92	389,30	60,37	595,00	1904,00	1
<b>2014</b>	Ren et al.	165,00	2,92	389,30	60,37	595,00	1984,00	1

